

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**

Patrícia Cristina Maiola

**ARQUITETURA MULTIAGENTE PARA A
COORDENAÇÃO DE RELÉS DE SOBRECORRENTE NA
PROTEÇÃO DE SISTEMAS RADIAIS NA PRESENÇA
DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**

Florianópolis

2014

Patrícia Cristina Maiola

**ARQUITETURA MULTIAGENTE PARA A
COORDENAÇÃO DE RELÉS DE SOBRECORRENTE NA
PROTEÇÃO DE SISTEMAS RADIAIS NA PRESENÇA
DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**

Dissertação submetida ao Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
para a obtenção do Grau de Mestre
em Engenharia Elétrica.
Orientadora: Prof^a. Jacqueline Gisèle
Rolim, Dr.

Florianópolis

2014

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Maiola, Patrícia Cristina

Arquitetura multiagente para a coordenação de relés de
sobrecorrente na proteção de sistemas radiais na presença de
geração distribuída / Patrícia Cristina Maiola ; orientador,
Jacqueline Gisèle Rolim - Florianópolis, SC, 2014.
130 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica.

Inclui referências

1. Engenharia Elétrica. 2. Proteção de sistemas de
distribuição. 3. Sistemas multiagentes. 4. Geração
distribuída. 5. Relés de sobrecorrente. I. Rolim,
Jacqueline Gisèle . II. Universidade Federal de Santa
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
III. Título.

Patrícia Cristina Maiola

**ARQUITETURA MULTIAGENTE PARA A
COORDENAÇÃO DE RELÉS DE SOBRECORRENTE NA
PROTEÇÃO DE SISTEMAS RADIAIS NA PRESENÇA
DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**

Esta Dissertação foi julgada aprovada para a obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Elétrica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Florianópolis, 19 de fevereiro 2014.

Prof. Patrick Kuo-Peng, Dr.
Coordenador do Curso

Prof^ª. Jacqueline Gisèle Rolim, Dr.
Orientadora

Banca Examinadora:

Prof^ª. Jacqueline Gisèle Rolim, Dr.
Presidente

Prof. Arturo Suman Bretas, Ph.D - UFRGS

Prof. Jomi Fred Hubner, Dr - UFSC

Eng^o Diego Issicaba, Dr

Dedico aos meus pais

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Antônio e Lilian, que sempre colocaram a educação dos seus filhos em primeiro lugar e com muito esforço e privações permitiram que eu chegasse aonde cheguei.

Ao meu amor, Marcos, que esteve ao meu lado em todos os momentos e soube me ouvir e incentivar com todo o carinho e paciência.

À minha orientadora, Jacqueline, que nos muitos anos trabalhando juntas se tornou minha segunda mãe e, como tal, soube quando e como me ajudar, me aconselhar e me guiar. Por toda a paciência e dedicação, muito obrigada!

À minha colega de disciplinas no mestrado, Graciele, que se tornou uma grande amiga e juntas dividimos momentos difíceis em que nos apoiamos e também momentos de alegria que sempre me lembrarei.

Aos meus colegas do LABSPOT, em especial Daniel, Danilo, Leonardo, Fernando Stock, Fernando Winter, e Nastasha, que estiveram junto e muito me ajudaram em provas, trabalhos, e coisas aleatórias da vida. Além disso, agradeço pelo companheirismo do dia-a-dia, em que foram muitas conversas e demos muitas risadas.

Aos meus amigos e familiares, que me incentivaram e também souberam entender e compreender os momentos difíceis e muitas vezes a ausência em confraternizações e datas especiais.

Ao engenheiro Salzano Sunero Garcia, que contribuiu com informações, explicações e dados do sistema da CELESC utilizado como sistema-teste, essenciais para a realização deste trabalho.

Ao CNPq, pelo incentivo financeiro durante o desenvolvimento deste trabalho.

“A educação é algo admirável, mas é bom lembrar, de vez em quando, que nada que vale a pena saber pode ser ensinado.”

Oscar Wilde

RESUMO

A inserção de unidades de Geração Distribuída nos sistemas de distribuição de energia elétrica pode trazer diversas vantagens, mas também implica em dificuldades operacionais devido principalmente às mudanças no fluxo de potência. A proteção desses sistemas é um dos aspectos mais impactados, pois seus projetos desde o estudo, compra de equipamentos e ajustes são definidos de acordo com o fluxo de potência e valores de curto-circuito. A complexidade dos estudos envolvidos na coordenação dos relés devido ao grande número de novas situações a serem consideradas pode ser tão grande que tanto a rapidez quanto a seletividade da proteção podem ser prejudicadas. Este trabalho propõe uma abordagem utilizando Sistema Multiagentes para a coordenação de relés de sobrecorrente na proteção de sistemas radiais com a inserção de geração distribuída. A arquitetura proposta permite uma coordenação *on-line* dos relés de sobrecorrente utilizando a comunicação entre os agentes, eliminando a complexa tarefa do estudo de coordenação tradicional. Para a avaliação do sistema proposto foram realizadas simulações em um sistema-teste baseado em um sistema real com os ajustes disponibilizados pela empresa distribuidora de energia e seus resultados comparados ao tempo de atuação do sistema proposto. Os resultados mostram um menor tempo de operação dos relés no sistema multiagente, principalmente na proteção de retaguarda, além de possibilitar a aplicação da função anti-ilhamento sem a necessidade de equipamentos adicionais.

Palavras-chave: Geração Distribuída, Proteção de Sistemas de Distribuição Radiais, Relés de Sobrecorrente, Sistemas Multiagentes

ABSTRACT

The insertion of Distributed Generation units in distribution systems has several advantages, but also might bring disadvantages mainly due to power flow changes. The protection of these systems is one of the most affected aspects, because their projects, from the study, equipment's purchase and settings are defined according to the power flow and short-circuit levels. The complexity of the studies involved in the coordination of the relays due to the large number of new situations to be considered may be so large that speed and selectivity of protection may be impaired. This dissertation proposes a Multi-agent System for coordination of overcurrent relays for protection of radial systems in the presence of distributed generation. The proposed architecture allows online coordination of overcurrent relays using the communication between agents, eliminating the complex task of traditional coordination study and improving protection efficacy. In order to evaluate the proposed system, simulations were performed on a real system and the data used to estimate the protection operation time of the real system with the settings provided by the utility company. The same data were applied in the proposed system and the results compared. Results show a lower operating time of the overcurrent relays, especially in backup protection, and enables the application of anti-islanding function without any additional equipment when using the proposed MAS.

Keywords: Distributed Generation. Radial Distribution Systems Protection. Overcurrent Relays. Multi-agent Systems

LISTA DE FIGURAS

2.1	Sistema com geração distribuída [1]	28
2.2	Situação de ilhamento [2]	31
2.3	Arquitetura de uma Microrrede [3]	35
2.4	Microrrede do Projeto Aomori [4]	39
3.1	Curva <i>tempo x corrente</i> dos elos fusíveis tipo K [5].	43
3.2	Exemplo de proteção de ramais de distribuição com fusíveis.	44
3.3	Exemplo de proteção de ramais de distribuição com o conjunto de religador e fusíveis.	45
3.4	Exemplo de proteção de ramais de distribuição com o conjunto de religador, chave seccionalizadora e fusíveis.	46
3.5	Exemplos de curvas de relés temporizados [5].	50
3.6	Proteção de linhas de distribuição com relés de sobrecorrente em sistemas tradicionais.	51
3.7	Coordenação de relés de sobrecorrente em sistemas tradicionais.	51
3.8	Proteção de linhas de distribuição tradicional com relés de sobrecorrente com adição de geração distribuída.	52
3.9	Atuação dos relés de sobrecorrente no caso de falta na linha 3.	52
3.10	Atuação dos relés de sobrecorrente no caso de falta na linha 1.	53
4.1	Agente reativo [6]	58
4.2	Agente cognitivo	58
4.3	Estrutura horizontal em camadas [7]	59
4.4	Estrutura vertical em camadas [7]	60
4.5	Coordenação de agentes [8]	64
4.6	Organização hierárquica	65
4.7	Organização em times	66
4.8	Organização baseada em coalisão	67
4.9	Organização baseada em congregações	68
4.10	Organização baseada em sociedades	68
4.11	Organização baseada em federações	69
4.12	Organização composta	70
4.13	Comunicação por <i>Blackboard</i>	70
4.14	Comunicação Mediada	71
4.15	Comunicação Direta	71

4.16	FIPA <i>Contract Net-Protocol</i> [9]	75
5.1	Plataforma JADE [10]	82
5.2	Serviço de Páginas Amarelas [9]	83
5.3	Arquitetura do SMA proposto	84
5.4	Lógica do agente Relé	85
5.5	Fluxograma geral do agente Coordenação	86
5.6	Exemplificação para localização da falta	86
5.7	Configuração base para as regras de proteção implemen- tadas.	87
5.8	Fluxo de mensagem na operação primária	90
5.9	Fluxo de mensagem na operação de retaguarda	91
6.1	Sistema-teste	93
6.2	Esquemático para a obtenção dos tempos de operação dos sistemas de proteção tradicional e proposto.	93
6.3	Esquema de proteção para falta na linha 4	95
6.4	Mensagens trocadas entre os agentes na proteção primária	97
6.5	(a) Mensagem do agente Coordenação para o Configura- dor (b) Mensagem de resposta do Configurador ao Co- ordenação	98
6.6	Mensagem do agente Coordenação para um agente Relé para abrir o disjuntor	99
6.7	(a) Mensagem do agente Coordenação para o Configura- dor (b) Mensagem de resposta do Configurador ao Co- ordenação	100
6.8	Mensagens trocadas entre os agentes na proteção de re- taguarda	101
6.9	Simulações Tipo 2 - Localização faltas fase-terra	103
6.10	Simulações Tipo 3 - Esquema de proteção para falta fase- fase na linha 3	104
6.11	Simulações Tipo 4	106
6.12	Simulação anti-ilhamento	108
6.13	Mensagens trocadas entre os agentes na proteção anti- ilhamento	109
A.1	IEC Normalmente Inversa [11]	118
B.1	Sistema original	124

LISTA DE TABELAS

1	Evolução da abordagem do planejamento da distribuição [12]	34
2	Atos comunicativos [9]	73
3	Parâmetros da mensagem ACL [9]	74
4	Tempo (ms) de operação da proteção primária e retaguarda do SMA para simulação Tipo 1	102
5	Operação dos sistemas para faltas fase-terra	103
6	Tempo (ms) de operação da proteção primária para falta fase-fase na linha 3	104
7	Tempo (ms) de operação da proteção de retaguarda do relé 8 para falta fase-fase na linha 3	104
8	Tempo (ms) de operação da proteção de retaguarda do relé 10 para falta fase-fase na linha 3	105
9	Tempo (ms) de operação da proteção de retaguarda do relé 11 para Falta 1	106
10	Tempo (ms) de operação da proteção de retaguarda do relé 9 para Falta 2	106
11	Tempo (ms) de operação da proteção de retaguarda do relé 7 para Falta 3	107
12	Tempo (ms) de operação da proteção do sistema tradicional para falta trifásica na linha 3	108
13	Tempo (ms) de operação da proteção do SMA para falta trifásica na linha 3 com proteção anti-ilhamento	110
14	Ajustes dos Relés do Sistema-teste	117

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	Considerações Iniciais	23
1.2	Objetivos deste trabalho	25
1.3	Organização da Dissertação	25
2	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E MICRORREDES	27
2.1	Geração Distribuída	27
2.1.1	Impactos da Geração Distribuída	28
2.1.1.1	Vantagens da Geração Distribuída	28
2.1.1.2	Desvantagens da Geração Distribuída	31
2.1.2	Evolução no planejamento da distribuição elétrica	33
2.2	Microrredes	34
2.2.1	Projetos de Microrredes no mundo	36
2.3	Conclusões	39
3	PROTEÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO	41
3.1	Proteção de Sistemas de Distribuição Tradicionais	41
3.1.1	Equipamentos de Proteção de Sistemas de Distribuição	42
3.1.1.1	Chave Fusível	42
3.1.1.2	Religador	44
3.1.1.3	Chave Seccionalizadora	46
3.1.1.4	Disjuntor	47
3.1.1.5	Relé de Sobrecorrente	48
3.2	Impactos na Coordenação de Relés de Sobrecorrente na Proteção dos Sistemas de Distribuição Radiais com a Inserção de Geração Distribuída	50
3.3	Conclusões	53
4	SISTEMAS MULTIAGENTES	55
4.1	O que são agentes	55
4.2	Classificação de agentes	57
4.3	Os Sistemas Multiagentes	61
4.4	Interação entre agentes	63
4.5	Tipos de organização	64
4.5.1	Hierárquica	65
4.5.2	Times	66

4.5.3	Organização baseada em coalisção	66
4.5.4	Congregações	67
4.5.5	Sociedades	67
4.5.6	Federações	68
4.5.7	Organização Composta	69
4.6	Comunicação entre agentes	69
4.6.1	Linguagem FIPA ACL	72
4.7	Aplicações de SMA em Proteção de Sistemas de Potência	74
4.8	Conclusões	79
5	ARQUITETURA MULTIAGENTE PROPOSTA	81
5.1	Plataforma JADE	81
5.1.1	Componentes da Arquitetura JADE	81
5.1.2	Execução de tarefas	82
5.2	Agentes do SMA proposto	83
5.2.1	Agente Relé	84
5.2.2	Agente Coordenação	85
5.2.3	Agente Configurador	87
5.2.4	Arquivos de dados	89
5.3	Fluxo de mensagem	89
6	SIMULAÇÕES E RESULTADOS	93
6.1	Sistema-teste	93
6.2	Configurações e considerações	94
6.3	Simulações	95
6.3.1	Simulação Tipo 1: Exemplificando o funciona- mento do SMA proposto	95
6.3.2	Simulações Tipo 2: Comportamento para faltas fase-terra	102
6.3.3	Simulações Tipo 3: Ganho de velocidade nas proteções primária e de retaguarda	103
6.3.4	Simulações Tipo 4: Ganho de velocidade nas proteções de retaguarda por facilidade de coordenação . . .	105
6.3.5	Simulação Tipo 5: Proteção anti-ilhamento sem necessidade de funções extras	107
6.4	Conclusões	110
7	CONCLUSÕES FINAIS	113
7.1	Sugestões para trabalhos futuros	114
	ANEXO A – Ajustes dos Relés do Sistema-Teste	117

ANEXO B – Dados originais do sistema real para ANAFAS121

REFERÊNCIAS

125

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os avanços da tecnologia e a rapidez das mudanças dos cenários vivenciados nas últimas décadas são expressivamente notadas no cotidiano, e para o setor elétrico as redes inteligentes (*smart grids*) representam este avanço. Elas são redes capazes de integrar de forma inteligente as ações dos usuários (geradores, consumidores e os que possuem os dois papéis) a elas conectados para que de forma eficiente seja feito o fornecimento sustentável, econômico e seguro da eletricidade [13]. Além de facilitar a inserção e operação de diferentes tipos de geração, nela o consumidor passa a ser um elemento ativo que pode ajustar seu uso de energia através das novas informações fornecidas, baixar seus custos e também escolher o tipo de energia que deseja comprar [14]. Para isso são necessárias novas tecnologias com produtos e serviços inovadores aliados ao monitoramento inteligente, controle e comunicação [13]. Entretanto, até que se alcance este modelo, um longo caminho deve ser percorrido. Ele teve início com a inserção de unidades de geração distribuída (GD) nas redes de distribuição tradicionalmente radiais e com fluxo de potência unidirecional (patamar atualmente já dominado), e passa pela adição em grande escala dessas unidades, e em seguida a formação de microrredes. Mais adiante estão as microrredes inteligentes e em seguida as redes inteligentes como sendo a interconexão controlada dessas microrredes inteligentes.

A inserção de unidades de GD apresenta diversas vantagens ao sistema e ao consumidor, pois sua instalação permite às empresas do setor elétrico o adiamento de investimentos em transmissão e distribuição, redução das perdas e melhora no controle de tensão. Além disso, quando devidamente planejada sua instalação e operação, possui o potencial de melhorar a confiabilidade e a qualidade de energia. A possibilidade de permitir a continuidade do fornecimento de energia para uma região que foi isolada da rede de distribuição principal (modo ilhado) é um dos grandes atrativos da sua adição no sistema. Para que se permita a operação ilhada, controles de frequência e tensão devem ser garantidos, além de um sistema de proteção adaptado a esta nova configuração [15]. A existência desses controles e funções que permitam o correto funcionamento do sistema possibilita a criação de microrredes no sistema.

As microrredes podem ser entendidas como um sistema inte-

grado entre as unidades de GD e várias cargas que operam de forma autônoma, com segurança e qualidade de energia, tanto conectado ou separado da rede principal [14]. Também, pode-se colocar como uma funcionalidade, mas não pré-requisito, de uma microrrede a possibilidade do controle do despacho considerando otimização na comercialização da energia de forma automatizada. Para isso, seriam necessários dispositivos com certo grau de inteligência para fazer esse gerenciamento. Um passo adiante seria incluir o consumidor como agente ativo nesta rede, e aumentar as possíveis funcionalidades para que se chegue ao que muitos consideram ser o conceito de uma rede inteligente.

Entretanto, no panorama geral e principalmente no Brasil, a inserção de unidades de GD ao longo do sistema ainda representa um problema em alguns aspectos, pois possui como uma desvantagem a alteração de uma característica importante no planejamento da operação e proteção do sistema de distribuição. Eles foram projetados de forma radial com fluxo unidirecional das subestações para cargas, e as unidades de GD criam um fluxo bidirecional e valores alterados para correntes de curto-circuito. Os equipamentos tradicionais não possuem direcionalidade e operam, em sua maioria, apenas com a análise de corrente. Já o aumento dos níveis de curto-circuito podem requerer a troca de equipamentos de chaveamento. Assim, novos equipamentos e estudos são necessários para garantir a qualidade e segurança do sistema. No caso dos relés de sobrecorrente, os novos equipamentos adquiridos pelas empresas são relés digitais [16], que possuem diversas vantagens, entre elas a possibilidade de implementação de técnicas de inteligência artificial, e uso de mais de um conjunto de ajustes. Entretanto, o uso desses relés ainda está sendo feito de forma tradicional. Com a inserção de GD as situações a serem consideradas para o projeto do sistema de proteção podem ser tão variadas que tornam esta tarefa bastante complexa e muitas vezes a coordenação e rapidez da sua atuação são prejudicadas. Além disso, a operação ilhada, que representa um dos grandes benefícios da GD, é indesejada pela maioria das distribuidoras por não haver o controle necessário para garantir a operação de forma segura e com qualidade de fornecimento.

Tendo em vista que para a concretização das redes inteligentes a utilização da inteligência artificial será essencial, e que na atualidade ainda existem problemas a serem resolvidos, ou aspectos melhorados, a abordagem dos Sistemas Multiagentes para a solução de alguns desses problemas se mostra interessante. Os sistemas multiagentes são sistemas compostos por entidades denominadas agentes, que devem possuir algum nível de inteligência, autonomia para agir e tomar decisões

sem a interferência de um operador, além da capacidade de interação e cooperação com outros agentes. A utilização de Sistemas Multiagentes (SMA) em sistemas de proteção se justifica pela sua natureza distribuída, onde cada dispositivo é responsável pela proteção de um determinado equipamento do sistema. Também, os sistemas multiagentes oferecem escalabilidade e flexibilidade, características essenciais quando se trata de sistemas em constante mudança com a quantidade de componentes quanto os sistemas de potência.

1.2 OBJETIVOS DESTES TRABALHOS

O objetivo geral deste trabalho é propor uma arquitetura de Sistema Multiagente para a coordenação dos relés de sobrecorrente em sistemas de distribuição radiais com a inserção de geração distribuída.

Os objetivos específicos são listados abaixo:

- Estudo do sistema de proteção tradicional e identificação dos principais problemas enfrentados na área de proteção com a inserção de unidades de GD nos sistemas de distribuição;
- Simulação de faltas em um sistema real para a análise da operação dos relés de sobrecorrente em diversas condições;
- Definição da arquitetura de um Sistema Multiagente para o tratamento dos impactos na coordenação dos relés de sobrecorrente em sistemas radiais com a inserção de unidades de GD;
- Desenvolvimento do sistema multiagente proposto na plataforma JADE;
- Avaliação do desempenho do sistema desenvolvido através da comparação dos resultados obtidos nas simulações com a operação do sistema de proteção real.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O capítulo 2 apresenta os aspectos gerais sobre a geração distribuída, discutindo suas vantagens e desvantagens. Em seguida são abordadas algumas definições referentes às microrredes, seus componentes e funcionamento. Ao final do capítulo alguns projetos de microrredes pelo mundo são brevemente descritos.

Os principais dispositivos dos sistemas de proteção de distribuição são abordados no início do capítulo 3. Também são explicados os efeitos na coordenação dos relés de sobrecorrente com a inserção de unidades de geração distribuída no sistema.

Os conceitos envolvendo agentes e os Sistemas Multiagentes são explorados no capítulo 4, assim como seus principais tipos de organização, formas de comunicação e funcionalidades. A revisão bibliográfica encontra-se no final deste capítulo, com as aplicações de sistemas multiagentes nos sistemas de potência.

No capítulo 5 é apresentada a arquitetura do Sistema Multiagente proposta neste trabalho para a coordenação dos relés de sobrecorrente em sistemas de distribuição radiais com inserção de geração distribuída. Além disso, são mostradas as funcionalidades específicas dos SMA utilizadas neste trabalho.

As simulações realizadas e os resultados obtidos são mostrados e discutidos no capítulo 6.

No capítulo 7 são apresentadas as principais conclusões e também algumas sugestões para trabalhos futuros.

2 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E MICRORREDES

2.1 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

O termo geração distribuída ainda não possui um conceito amplamente aceito, como pode ser verificado em alguns exemplos citados abaixo:

O conceito adotado pelo CIGRE (*The International Council on Large Electric Systems*) é de que a geração distribuída não possui despacho centralizado, também não é planejada de forma centralizada, geralmente é conectada à rede de distribuição e possui capacidade inferior a 50-100MW [17].

Já o IEEE (*The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.*) define GD como a geração de eletricidade com instalações suficientemente menores que as plantas centrais, para que permita a interconexão em qualquer ponto próximo aos centros de carga da rede elétrica existente [18].

O conceito de geração distribuída utilizado pela Agência Nacional de Energia Elétrica, ANEEL, nos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) é de que são unidades de geração de energia elétrica, não importando a potência, mas que devem ser conectadas diretamente na rede de distribuição ou através de instalações de consumidores. Sua operação pode ser paralela ou isolada e seu despacho pode ou não ser feito pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) [19].

Destas definições pode-se extrair uma característica importante da GD, que é ser uma unidade de geração conectada à rede elétrica de distribuição, conseqüentemente, próxima dos centros de carga. Com isso, a operação da GD pode ter diversas finalidades nos sistemas de distribuição, por exemplo atuando como uma reserva utilizada para suprir a demanda nos picos de carga, ou à disposição de cargas prioritárias para ser usada para momentos de faltas ou necessidades específicas. Além disso, pode funcionar como fonte de energia constante para o auto consumo industrial, comercial ou residencial podendo ou não possuir produção excedente para comercialização.

Na geração distribuída diversas tecnologias com diferentes fontes de energia têm sido aplicadas, dentre as quais se destacam:

- Geradores Eólicos;
- Microturbinas a Gás;

- Células a Combustível;
- Painéis Fotovoltaicos;
- Pequenas Centrais Hidroelétricas (PCHs)

Na Figura 2.1 é representado um sistema demonstrando a localização e variedade da geração distribuída.

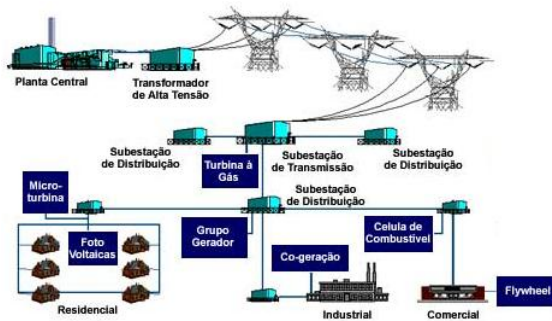


Figura 2.1 – Sistema com geração distribuída [1]

2.1.1 Impactos da Geração Distribuída

A inserção de unidades de geração distribuída nos sistemas de distribuição modifica não somente a topologia da rede com consequências como por exemplo a redistribuição do fluxo de potência, mas também impacta em questões ambientais e sociais. Esses impactos possuem pontos positivos e negativos que serão discutidos nas seções seguintes.

2.1.1.1 Vantagens da Geração Distribuída

Questões sociais

A geração distribuída possibilita o desenvolvimento local com a geração de empregos e aproveitamento de recursos disponíveis na região, possibilitando uma revitalização das atividades econômicas e aumentando o volume de serviços [20]. Os parques eólicos são um exemplo onde os proprietários das terras podem alugar parte da sua

terra para a instalação de aerogeradores com pouca perda nas suas áreas cultiváveis [21].

Outro ponto é a continuidade da energia em cargas prioritárias como hospitais e aeroportos, onde a geração distribuída pode dar suporte caso haja falha no fornecimento de energia elétrica da concessionária responsável. A diversificação das fontes energéticas também aumenta a continuidade retirando a dependência exclusiva de determinados tipos de recurso, evitando ou ao menos reduzindo a necessidade de racionamento em épocas de seca no Brasil.

Ainda, por se tratarem de unidades distribuídas de menor porte, existe a possibilidade de melhoria da qualidade do fornecimento de energia em regiões remotas onde o atendimento é inviável ou precário por questões ambientais ou econômicas [21].

Questões ambientais

As regulamentações ambientais estão cada vez mais rígidas quanto à construção de novas centrais elétricas de grande porte e utilização de faixas de servidão para novas linhas de transmissão, barreiras e dificuldades são impostas por organizações ambientais e pelo crescimento da ocupação urbana. Com isso, investidores são induzidos a procurar novas opções em fontes de energia mais limpas e com melhor relação entre custo e eficiência para garantir a aprovação e rapidez dos seus projetos [21]. A instalação de unidades de GD no lugar de grandes centrais de geração e linhas de transmissão minimiza os impactos ambientais.

Redução de perdas

Quando propriamente localizada, a geração distribuída pode reduzir as perdas no sistema, funcionando da mesma maneira que bancos de capacitores estrategicamente instalados para a minimização das perdas, mas alterando tanto o fluxo de potência ativa quanto reativa. Uma redução significativa pode ser alcançada em alimentadores com grandes perdas com o atendimento de 10-20% da demanda do alimentador através de unidades de GD devidamente localizadas [15]. Caso a inserção de GD tenha como um dos objetivos a redução de perdas no sistema, faz-se necessário um estudo para garantir que estes fiquem devidamente situados. Pesquisas nesta área estão sendo feitas, como em [22], onde é apresentado um algoritmo utilizando o método primal-dual de pontos interiores para solucionar fluxo de potência ótimo não-linear com o objetivo de otimizar a localização e tamanho das unidades de

geração distribuída para a minimização das perdas no sistema, que mostrou-se eficaz nos testes realizados.

Outro aspecto importante é que com o fornecimento de energia pela GD próxima aos centros de carga, a quantidade de energia perdida na transmissão desde a geração até a carga é reduzida pois menor é a potência demandada da fonte principal.

Suporte de tensão

Os níveis de tensão em um sistema devem ser mantidos em torno da tensão nominal para garantir a qualidade de energia entregue ao consumidor. Entretanto, flutuações de tensão ocorrem e podem comprometer o bom funcionamento do sistema. Essas flutuações são geralmente maiores nos finais das linha e mais acentuadas caso haja uma concentração maior de carga nesta extremidade [23].

A possibilidade de alocar as unidades de GD em locais apropriados e também fazer uma operação coordenada, colocando a GD gerando mais quanto maior for o aumento da carga (localmente), permite que haja um suporte para diminuição das flutuações de tensão.

Alívio de carregamento de transmissão e distribuição

Com a possibilidade do suprimento parcial ou total da potência reativa localmente através da GD, existe a redução da corrente transmitida para suprir a carga e também a diminuição da queda de tensão na linha de transmissão. Consequentemente, existe a redução das perdas, o que melhora o fator de potência e com isso uma quantidade maior de potência ativa pode ser transmitida.

Outro ponto é o alívio direto no carregamento quando uma carga passa a ser atendida pela geração local, ou seja, menor é o fluxo de potência no sistema, pois menos energia é fornecida pelas grandes centrais. Isto fica mais evidente quando há a necessidade de expansão das redes de transmissão e distribuição para atender apenas aos picos de demanda e com o uso de GD para atender aos horários de ponta isto é evitado.

Assim, a redução no carregamento permite que investimentos na compra de novos equipamentos e construção de novas subestações e alimentadores possam ser adiados ou até mesmo evitados.

Possibilidade de aumento da confiabilidade

O aumento da continuidade de fornecimento está ligado a possibilidade de ilhamento. A operação ilhada é quando uma ou mais unidades de GD continuam o fornecimento de energia para as cargas que estão interligadas depois do interrompimento da ligação com a fonte principal, como é ilustrado na Figura 2.2.

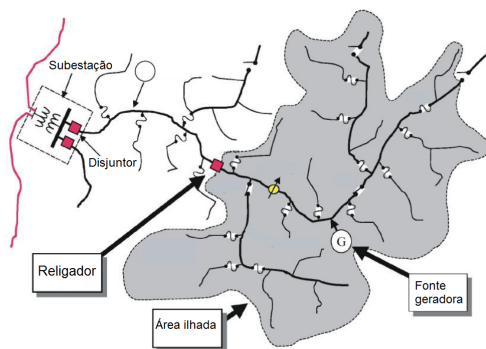


Figura 2.2 – Situação de ilhamento [2]

Na ocorrência de uma falta existe o isolamento desta através do corte do fornecimento de energia no local, o que para sistemas radiais tradicionais significa, dependendo da localização do equipamento de chaveamento, o corte de energia para as cargas à montante da falta e também o corte do fornecimento à jusante da falta. Entretanto, a geração distribuída permite que se tenha uma geração de retaguarda local que possa assumir estas cargas (localizadas à jusante da área isolada sob falta) enquanto o fornecimento principal não é restabelecido. Em contrapartida, para que este suporte seja eficaz, quesitos de qualidade e segurança devem ser obedecidos, o que atualmente limita seu uso.

2.1.1.2 Desvantagens da Geração Distribuída

A inserção de unidade de GD pode afetar também de forma negativa o sistema. Além disso, alguns dos pontos colocados como vantagens possuem também dificuldades para sua utilização e serão aqui brevemente abordados.

Regulação de tensão

Conforme mencionado anteriormente, pode-se utilizar a GD para melhorar os níveis de tensão com uma operação coordenada com a variação de carga. Entretanto, existem casos em que esta coordenação não é possível (ou não desejável), com a geração variando de acordo com o preço da energia no mercado por exemplo. Nestes casos podem ocorrer momentos em que a presença de GD piore o perfil de tensão quando comparado com o sistema sem ela, como num período de carga leve mas produção alta da GD [23].

Ainda, as práticas de regulação de tensão em sistemas radiais consideram o fluxo de potência unidirecional partindo da subestação para a carga, e a GD interfere nesse fluxo alterando a operação da regulação e até mesmo prejudicando sua eficiência. Por exemplo, a inserção de GD à jusante de um LDC (*Line Drop Compensation*) pré-existente na rede pode causar o efeito contrário ao desejável, quando a produção da GD pode levar o LDC a uma determinação incorreta da tensão no final da linha e consequentemente uma compensação incorreta [15].

Impactos nos sistemas de proteção

Tradicionalmente os sistemas de distribuição possuem uma topologia radial com fluxo de potência unidirecional e com base nisto são projetados e ajustados os equipamentos de proteção como fusíveis, relés, seccionadoras, relés de sobrecorrente, etc.

Entretanto, quando uma ou mais unidades de GD são inseridas na rede o fluxo passa a ser bidirecional alterando as condições de falta. Além disso, as faltas não são mais isoladas com a abertura do circuito apenas pelo lado da subestação, é necessário também que se extinga a contribuição das unidades de GD à jusante da falta. Isso faz com que sejam necessários novos ajustes nos equipamentos ou ainda novos dispositivos se tornam indispensáveis, como é o caso da adição de relés direcionais.

Outro ponto que interfere na proteção é o aumento dos níveis de curto-circuito que pode fazer com que ocorra perda de coordenação da proteção do sistema pré-existente ou mesmo que limites de operação de alguns equipamentos sejam excedidos. Então, estudos são necessários para que se garanta uma adequação do sistema de proteção perante as novas condições da rede.

Para evitar ilhamentos indesejados são utilizadas funções de tensão e frequência na proteção do gerador da GD, mas em alguns casos são necessárias proteções adicionais anti-ilhamento [15].

Como o impacto causado nos sistemas de proteção com a inserção de unidade de geração distribuída é uma das motivações para o desenvolvimento deste trabalho, este assunto será melhor explorado no próximo capítulo.

Ilhamento Indesejado

Apesar de ser vantajosa sob diversos aspectos já citados, a operação ilhada é atualmente indesejada na maioria das distribuidoras de energia. Isso porque quando o sistema não está devidamente preparado para tal situação podem ocorrer problemas com segurança e qualidade no fornecimento de energia. A qualidade da energia entregue às cargas ilhadas pode ficar comprometida devido ao “despreparo” das unidades de GD quanto a manutenção da carga com requisitos de tensão e frequência dentro dos limites aceitáveis. Além disso, podem ocorrer danos para os equipamentos da distribuidora, geradores e consumidores no religamento não esperado da ilha energizada com a rede [15].

Enquanto é esperado que na ocorrência de uma interrupção de fornecimento da rede central toda a GD naquele sistema seja desconectada, ou seja, não é permitida a operação ilhada, as equipes de manutenção trabalham com esta premissa. Entretanto, caso haja alguma falha e alguma GD ainda esteja conectada, sérios problemas de segurança podem ocorrer, pois os trabalhadores consideram a rede desenergizada.

2.1.2 Evolução no planejamento da distribuição elétrica

Atualmente os procedimentos de operação do sistema não permitem o uso eficiente dos recursos oferecidos pela geração distribuída. Os planos de contingência para lidar com situações de faltas na rede distribuidora ou perdas de grandes unidades de geração são efetuados através de corte de carga ou mesmo desligamentos forçados. Estes planos são feitos mesmo havendo geração local suficiente para o abastecimento de pelo menos parte da carga desconectada, mas como não há devida coordenação e planejamento para garantir o controle e qualidade da energia, a operação ilhada não é autorizada.

Na Tabela 1 é apresentado um resumo do planejamento dos sistemas de distribuição considerando a sua abordagem tradicional no passado e sua evolução com a geração distribuída nos dias de hoje e no

futuro com as microrredes [12].

Tabela 1 – Evolução da abordagem do planejamento da distribuição [12]

	Passado	Presente	Futuro
Planejamento	Distribuição Tradicional	Geração Distribuída	Microrredes
Integração da geração	Centralizada, geração de retaguarda	Descentralizada, Baixa e Média penetração de GD	Descentralizada, Média e Alta penetração de GD
Carga	Sem diferenciação	Classificação das cargas baseada em requisitos de qualidade e controle (crítica/não crítica, controlável/não controlável)	
Rede de distribuição	Atendida pela subestação, rede passiva	Rede semi-ativa	Rede ativa, troca de energia bi-direcional
Gerenciamento de contingência	Corte de carga baseado em frequência, desligamento forçado	Corte de carga, desconecta GD	Ilhamento e operação autônoma, compartilhamento de energia.

Este processo de evolução deve acompanhar as mudanças nos pensamentos da sociedade quanto a valores sociais e comerciais. Ou seja, para que sejam feitas estas adaptações são necessárias novas tecnologias e também novos conceitos na segurança do sistema, meio ambiente, qualidade da energia, custo do fornecimento e eficiência energética. Além disso, uma grande preocupação da sociedade atual é quanto a sustentabilidade, sendo essa uma característica importante a ser apresentada pelas novas tecnologias, aliada à confiabilidade e boa relação custo/eficiência [24].

2.2 MICRORREDES

Segundo o IEEE, as microrredes (*microgrids*) são sistemas de potência que possuem as seguintes características [25]:

- possuem geração distribuída e carga;
- possuem a habilidade de desconectar-se do sistema principal e operar em paralelo.
- incluem o sistema de potência local e podem incluir porções de áreas do sistema de principal.

- são intencionais e planejadas.

Além da geração distribuída, outro componente importante de uma microrrede é o dispositivo de armazenamento de energia. Esses dispositivos funcionam como uma reserva acionada para equilibrar geração e carga auxiliando na qualidade da energia fornecida na microrrede. Eles permitem que as unidades de geração distribuída forneçam energia constante e estável mesmo com flutuações de carga. Também auxiliam quando há variações de energia primária, como nas dependências de vento ou sol, fornecendo suporte de geração. Na ocorrência de distúrbios estes dispositivos garantem o fornecimento de energia até que os geradores reserva estejam prontos para assumir a carga [26].

As principais tecnologias existentes atualmente como formas de armazenamento são: baterias, supercapacitores e volantes de inércia (*Flywheels*). Os *Flywheels* estão sendo considerados uma boa alternativa para suportar cargas críticas durante interrupções de fornecimento no sistema elétrico, pois apresentam uma resposta mais rápida que os dispositivos de armazenamento eletroquímicos [26].

A Figura 2.3 apresenta um exemplo de uma microrrede. Nela observa-se primeiramente a existência de diferentes tecnologias na geração de energia e também de um dispositivo de armazenamento. Também existem os elementos de controle nas cargas e na geração, além de controladores centrais e o gerenciador do sistema de distribuição. Este conceito de microrrede com controle central é baseado no projeto *Microgrids* [3], melhor descrito na seção 2.2.1.

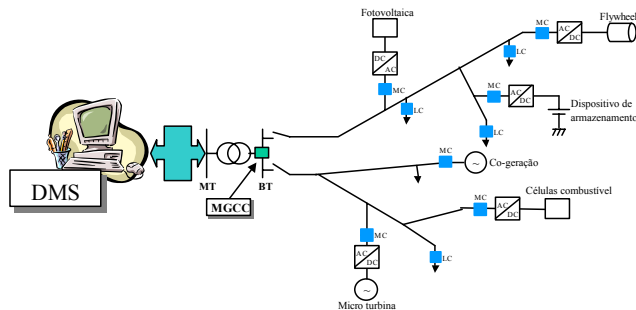


Figura 2.3 – Arquitetura de uma Microrrede [3]

O controle da microrrede é executado de forma hierárquica, com o propósito de otimizar a operação do sistema em geral, fornecendo uma integração entre as unidades de GD da microrrede e o sistema

de distribuição à montante. Para isso são utilizados controladores locais de micro geração (*Micro Source Controllers* - MC) e carga (*Load Controllers* - LC), um controlador central da microrrede (*MicroGrid System Central Controller* - MGCC) e um gerenciador do sistema de distribuição (*Distribution Management System* - DMS).

O MC possui duas posições distintas, uma quando a microrrede está conectada na rede e outra quando ilhada. Na operação conectada o seu funcionamento é ditado por ordens do MGCC, já na operação ilhada o MC possui autonomia para otimizar localmente a produção de potência ativa e reativa. Informações locais são utilizadas para controlar a tensão e frequência da microrrede durante transitórios. O LC é instalado em cargas controláveis e seu funcionamento é regido por políticas de gerenciamento de demanda ou corte de carga também seguindo ordens do MGCC [3].

O MGCC é responsável pela otimização da operação da microrrede atuando na qualidade da energia fornecida e também objetivando um melhor desempenho no mercado de energia. Para isso são utilizados preços do mercado de energia e possíveis pedidos de gerenciamento de demanda para determinar o montante de energia demandada do sistema, otimizando a capacidade de produção local. É o MGCC que envia ordens para os controles locais tanto de geração como de carga, além de receber destas informações para monitoração [3].

O DMS é a ligação entre a microrrede e o resto do sistema, fornecendo o gerenciamento e controle das diversas microrredes conectadas ao sistema de distribuição. Sua comunicação é direta com o MGCC passando informações como preços do mercado de energia, ou ordenando uma maior geração da microrrede para suprir a carga de outra área do sistema em momento de contingência [3].

2.2.1 Projetos de Microrredes no mundo

O interesse em desenvolver tecnologias para o correto aproveitamento dos benefícios oferecidos pela geração distribuída através das microrredes vem aumentando os investimentos em projetos nesta área. Países como Estados Unidos, Japão, Canadá e membros da União Européia se destacam no investimento em projetos com foco nas microrredes, e nesta seção serão apresentados alguns destes projetos. Para maiores detalhes as referências [26] e [4] podem ser consultadas.

A União Européia (UE) tem aplicado grande esforço no desenvolvimento das microrredes através de fortes investimentos em projetos

RD&D (*Research, Development and Deployment*) destinados exclusivamente ao estudo do funcionamento e aprimoramento das microrredes. Dois grandes projetos devem ser citados: *Microgrids* e *More Microgrids*.

O *Microgrids: Large Scale Integration of Micro-Generation to Low Voltage Grids* (1999-2002) contou com a participação de 14 países da UE, representados por empresas de distribuição, universidades e fabricantes. Este projeto teve como foco a operação de uma única microrrede e obteve sucesso ao demonstrar através de testes em laboratório que a operação de uma microrrede é viável e também investigar técnicas de controle apropriadas para esta operação [26]. Também foram criadas filosofias de operação da microrrede conectada e ilhada, além de esquemas de proteção e aterramento [4].

O controle central da microrrede (MGCC) promove a operação técnica e econômica, interage com as cargas e micro gerações e gerencia a demanda. Fornece também uma supervisão do controle local para cargas e micro geração que podem ser interrompidas [4].

Na ilha de Kythnos, Grécia, foi instalado um projeto piloto do *Microgrids* para testar estratégias de controle centralizado e descentralizado no modo ilhado. Nela, 12 casas são abastecidas através de uma geração composta por duas plantas fotovoltaicas (10 kW e 2 kW), um banco de baterias de 53 kWh e um grupo gerador diesel de 5 kW [27]. Em 2008 foi instalado nesta ilha, na microrrede real, um Sistema Multiagente para o controle inteligente de carga [28].

Dando continuidade nas pesquisas, em 2002 foi iniciado o projeto *More Microgrids: Advanced Architectures and Control Concepts for More Microgrids*, com a participação de 11 países da UE que incluem universidades, fabricantes e também distribuidoras de energia. Nele o objetivo, além de continuar as pesquisas visando a melhora da operação das microrredes, é estudar e avaliar novos conceitos de redes considerando a crescente inserção de geração distribuída. Para isso, são investigadas técnicas de controle e gerenciamento de multimicrorredes (*multimicrogrids*) alternativas além de diferentes topologias do sistema, e também uma padronização de protocolos técnicos e comerciais dessas novas redes [26].

Além dos projetos piloto citados, a Dinamarca, Itália, Portugal e Espanha também possuem instalações experimentais relacionadas ao RD&D da União Europeia. Investimentos nacionais e regionais dão suporte a projetos no Reino Unido, Alemanha, Espanha, Holanda entre outros [4].

Nos Estados Unidos o projeto mais conhecido na área de microrredes é desenvolvido através do CERTS *Consortium for Electric*

Reliability Solutions, que em 2002 criou o conceito de uma microrrede CERTS. A ideia é criar uma microrrede capaz de operar normalmente com o sistema e caso ocorra algum evento que prejudique a qualidade da energia fornecida para as cargas, essa microrrede desconecta-se da rede e garante o abastecimento e reconecta-se assim que o distúrbio for eliminado, de forma que estas manobras não sejam sentidas pelos consumidores [29].

A característica principal deste conceito que claramente o difere do projeto *Microgrids* é a não existência de um controlador principal, ou seja, cada fonte é conectada “ponto-a-ponto” com o controle localizado e não há uma entidade que receba essa informação e detenha o conhecimento do funcionamento de toda a microrrede [26]. Nela existem dois principais componentes: uma chave estática e fontes autônomas. A chave estática possui a habilidade de isolar a microrrede de distúrbios no sistema como faltas ou perda de qualidade na energia. Isso transfere a microrrede para um estado ilhado e de forma automática ela é reconectada ao sistema quando possível. Para atingir o sincronismo é monitorada a diferença de frequência entre a microrrede ilhada e a rede de distribuição.

Além de simulações em laboratórios, o CERTS possui também uma microrrede para testes na *American Electric Power's Walnut* situada em Columbus, Ohio. O intuito dos testes é demonstrar o comportamento dinâmico de cada componente da microrrede, como a transição suave dos estados conectada, ilhada e reconectada, o funcionamento do sistema de proteção, resposta rápida da geração, e também o rastreamento de carga autônomo [29].

No Japão diversas pesquisas vem sendo realizadas e apoiadas pela *New Energy and Industrial Technology Development Organization* (NEDO), uma organização que apoia projetos para a demonstração do funcionamento de microrredes em locações reais. Em 2005 foram instaladas microrredes de três projetos no Japão: Projeto Aichi (atualmente na *Central Japan Airport City*), Projeto Kyotango (Kyotango City) e o Projeto Hachinohe (Hachinohe City) [30]. Esses projetos possuem como um de seus objetivos o equilíbrio entre carga e geração através de sistemas de controle desenvolvidos [26].

Na Figura 2.4 pode ser observado um esquemático da microrrede do Projeto Aomori, que possui como característica a existência de apenas fontes de energia renováveis (fotovoltaica, eólica e biomassa) para o fornecimento de energia e calor. A planta de geração consiste em três geradores a gás de 170 kW (510 kW no total), 50 kW em painéis fotovoltaicos, um banco de baterias de 100 kW e uma caldeira a bio-

massa (madeira) com capacidade de 1,0 t/h [30]. Para fazer o controle de carga e geração é utilizada uma estratégia com três etapas: um planejamento semanal de fornecimento e demanda, controle de despacho econômico a cada três minutos e a cada segundo um controle de fluxo de potência nos pontos de conexão [26]. Com isso, no período de Novembro de 2005 até Julho de 2006 obteve-se uma redução de 57,3% no consumo de energia primária e 47,8% de redução na emissão de carbono [4] em relação aos valores antes da implantação dos controles.

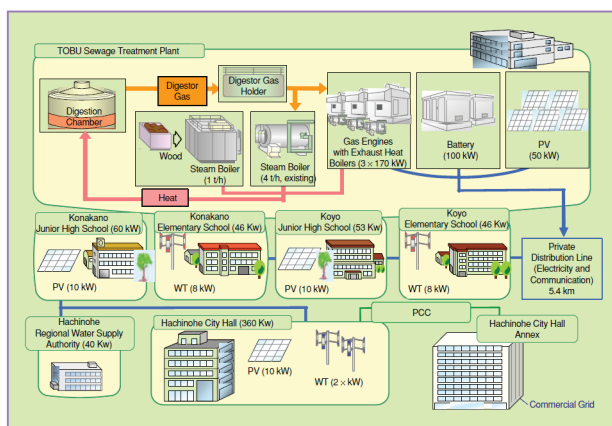


Figura 2.4 – Microrrede do Projeto Aomori [4]

2.3 CONCLUSÕES

A utilização da geração distribuída pode fornecer mais vantagens do que as que atualmente estão sendo obtidas na maioria das distribuidoras brasileiras. O uso da GD está limitado ao suprimento de algumas cargas quando conectada à rede de distribuição, não podendo operar de forma ilhada, para que não se comprometa a qualidade de energia e a segurança. Para que se possa usufruir de toda a sua capacidade, novas tecnologias devem ser estudadas e criadas no intuito de transformar esta rede passiva/semi-ativa em uma rede ativa e autônoma.

Grandes projetos vêm sendo desenvolvidos principalmente na Europa, Estados Unidos e Japão conforme mencionado neste capítulo, e resultados promissores já foram constatados em diversos casos. Aliado a isto estão os estudos quanto à utilização dos Sistemas Multiagentes,

que fornece uma solução que se adequa às necessidades e desafios impostos neste novo modelo de rede. Este assunto será melhor explorado no Capítulo 4 na seção 4.7.

3 PROTEÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

A operação do sistema de energia elétrica visa manter o fornecimento de energia com qualidade e operando de maneira segura e econômica. Entretanto, constantemente perturbações de diferentes naturezas, fenômenos naturais ou falha em equipamentos, afetam o bom funcionamento do sistema. Os sistemas de proteção são os responsáveis por minimizar os danos causados por essas perturbações, tanto protegendo equipamentos de grande importância para o sistema elétrico (como geradores e transformadores de potência) como para garantir que o menor número de consumidores seja afetado. Para isso a proteção de sistemas elétricos deve obedecer a três principais quesitos:

- seletividade: a falta deve ser isolada de forma a minimizar os danos, isolando apenas a menor área que contenha o defeito e garantindo o fornecimento de energia no restante do sistema;
- rapidez: o isolamento da falta deve ocorrer o mais rapidamente possível;
- confiabilidade: a proteção não deve operar indevidamente quando não há falta no sistema, assim como deve ser garantida sua operação na existência de uma falta.

Outro ponto importante é que o sistema deve ser economicamente viável, por isso não adianta um sistema com diversos equipamentos de proteção que possui uma maior probabilidade de ser eficiente se seu custo for muito alto. Para isso se fazem necessários os estudos de proteção para planejar um sistema o mais eficiente possível dentro de um custo aceitável.

3.1 PROTEÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO TRADICIONAIS

Os sistemas de distribuição convencionais são tradicionalmente radiais, possuindo como característica principal o fluxo de energia unidirecional fluindo da fonte para as cargas. Estes sistemas são mais simples e mais econômicos, mas possuem como desvantagem a alta taxa de descontinuidade de fornecimento. Isso porque, para todos os consumidores que estão à jusante de uma falta no seu alimentador, ramal

ou na ocorrência de uma falta que isole a subestação, o fornecimento é interrompido.

A característica radial com fluxo de energia unidirecional possui a vantagem de permitir o uso de um sistema de proteção com dispositivos mais simples que não verificam direcionalidade, como fusíveis, religadores e relés não direcionais e que possuem sua operação baseada na corrente que por eles flui.

Os dispositivos de proteção mais utilizados nos sistemas de distribuição radiais serão apresentados na subseção seguinte.

3.1.1 Equipamentos de Proteção de Sistemas de Distribuição

3.1.1.1 Chave Fusível

Os fusíveis são dispositivos empregados na proteção contra sobrecorrentes e curtos-circuitos, sendo que a interrupção de corrente é feita de maneira súbita. Uma grande vantagem deste dispositivo é que nele estão incorporadas tanto a função de detecção quanto de interrupção do problema, tornando esta solução mais economicamente atrativa quando comparada a outros equipamentos que operam em conjunto como os disjuntores e relés de proteção (e equipamentos de medição necessários). Entretanto, após a atuação do fusível é necessária a reposição manual deste elemento para a recomposição do sistema. A chave fusível é utilizada em redes aéreas de distribuição urbana e rural e também em pequenas subestações de consumidores e de concessionárias [5].

As propriedades construtivas do fusível são tais que seu comportamento não é alterado com a corrente nominal, mas quando uma corrente for maior que o limite máximo de não fusão o elo fusível deve fundir, interrompendo a corrente de falta. O arco elétrico que é formado com a ionização do ar é extinto com ação dos gases desionizantes gerados no interior do tubo protetor que abriga o elo fusível que elevam a rigidez dielétrica e impedem que haja reignição do arco elétrico após a passagem da corrente por zero [31].

Os fusíveis possuem uma característica chamada *tempo x corrente*, que mostra o tempo que este fusível leva para se fundir quando por ele está passando determinada corrente. Existem 3 tipos de fusíveis de acordo com suas características de curva de atuação *tempo x corrente*, são eles [5]:

- Tipo H - utilizados na proteção primária de transformadores de

distribuição e fabricados para correntes de até 5A. Apresentam uma atuação lenta para altas correntes, sendo considerados de alto surto.

- Tipo K - utilizados na proteção de redes aéreas de distribuição urbanas e rurais, e são considerados fusíveis de atuação rápida.
- Tipo T - principalmente utilizados na proteção de ramais primários de redes aéreas de distribuição, são considerados fusíveis de atuação lenta.

Na Figura 3.1 é apresentado o gráfico de curvas *tempo x corrente* de fusíveis tipo K.

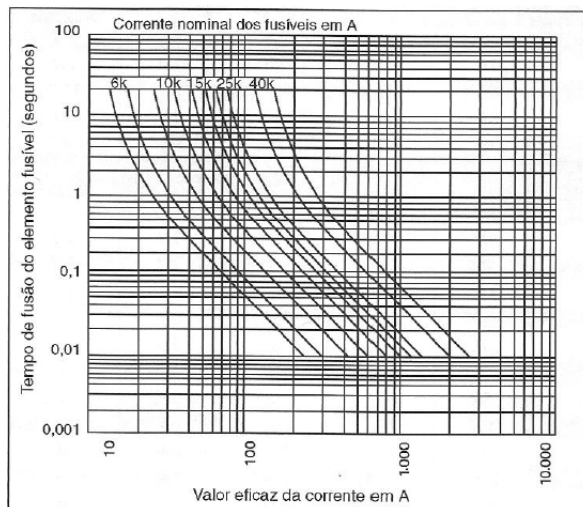


Figura 3.1 – Curva *tempo x corrente* dos elos fusíveis tipo K [5].

É através da característica *tempo x corrente* que a proteção nas redes de distribuição pode ser coordenada, conforme o exemplo da Figura 3.2.

O elo protetor é considerado aquele que se encontra mais próximo à carga, enquanto o elo protegido se encontra a montante do elo protetor [31].

Segundo [5], a regra seguida por norma para a coordenação entre elos fusíveis é que o tempo máximo total de interrupção do elo protetor não deve ser maior que 75% do tempo mínimo de fusão do elo protegido. Esta é uma margem de segurança para compensar alguns fatores como

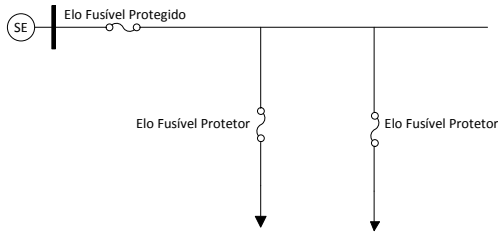


Figura 3.2 – Exemplo de proteção de ramais de distribuição com fusíveis.

a variação diária de temperatura do ambiente, pré-aquecimento pela corrente de carga, etc.

3.1.1.2 Religador

Os religadores automáticos são equipamentos de grande importância para a operação dos sistemas de distribuição, pois seu modo de funcionamento permite a diferenciação entre faltas permanentes e faltas transitórias. Essa característica traz como vantagem a diminuição de tempo de fornecimento interrompido, através da redução da necessidade de deslocamento de equipes para a troca manual do elemento queimado (caso do elo fusível, por exemplo).

Esse equipamento possui a capacidade de repetir as operações de abertura e fechamento do circuito durante uma falta, sendo que estas repetições podem ser de forma rápida ou retardada com uma sequência previamente programada. Quando uma corrente anormal é sentida pelo religador seus contatos principais são abertos e, após um determinado tempo, chamado tempo de religamento, o religador, de forma automática, fecha seus contatos novamente. Caso a corrente de falta persista, o religador inicia um novo ciclo de operações de abertura e fechamento pré-programadas. São permitidas no máximo 4 operações que podem ser da seguinte forma [5]:

- uma operação de abertura rápida e três retardadas;
- duas operações de abertura rápidas e duas retardadas;

- três operações de abertura rápidas e uma retardada;
- quatro operações rápidas.

Com isso, é possível que se faça uma coordenação associando religadores a elos fusíveis e/ou chaves seccionalizadoras para uma proteção mais eficiente e econômica. A Figura 3.3 demonstra a utilização combinada de um religador, protegendo o alimentador primário, enquanto os fusíveis são utilizados para a proteção dos alimentadores secundários.

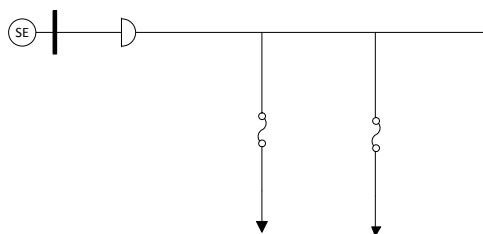


Figura 3.3 – Exemplo de proteção de ramais de distribuição com o conjunto de religador e fusíveis.

De acordo com [5], para alcançar a coordenação entre o religador e o elo fusível é necessário seguir as seguintes regras:

- Valor da corrente mínima de curto-circuito entre fases em qualquer ponto à jusante do elo fusível deve ser inferior à corrente de acionamento do religador;
- O religador deve, em geral, ser programado no ciclo de operação de duas operações rápidas e duas retardadas;
- Tempo mínimo de fusão do elo fusível para valores de corrente à jusante do seu ponto de instalação deve ser maior que o tempo de abertura do religador na curva de característica rápida;
- Tempo de abertura do elo fusível para valores de corrente a jusante do seu ponto de instalação deve ser inferior ao tempo de abertura do religador na curva retardada, considerando o religador programado para duas operações retardadas.

Assim, na ocorrência de uma falta temporária a operação rápida do religador impede a queima dos elos fusíveis nos ramais secundários, garantindo que não haja interrupção desnecessária de fornecimento para os consumidores. Além disso, o elo fusível opera para faltas permanentes à jusante de seu ponto de instalação, interrompendo o fornecimento de energia apenas para o seu ramal secundário.

3.1.1.3 Chave Seccionalizadora

A chave seccionalizadora é um dispositivo empregado em conjunto com religadores na proteção de ramais do sistema de distribuição, pois ela não interrompe a corrente de defeito, mas sim é feita uma coordenação com o religador para melhorar a seletividade.

A instalação da chave seccionalizadora é feita em série com o religador no lado da carga, conforme Figura 3.4. Sua operação ocorre através da contagem de interrupções feitas pelo religador. Assim, a cada interrupção da corrente de falta feita pelo religador, a chave seccionalizadora conta uma interrupção, e depois de um número pré-definido de interrupções (uma, duas, ou três) ela abre seus contatos no momento em que a corrente passando por ela é menor que um determinado valor e antes da abertura definitiva do religador. Com isso, um trecho sob falta permanente pode ser isolado, enquanto o religador e os outros trechos em situação normal permanecem energizados [31].

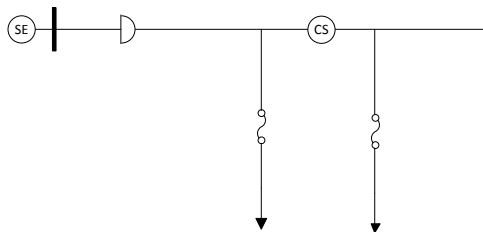


Figura 3.4 – Exemplo de proteção de ramais de distribuição com o conjunto de religador, chave seccionalizadora e fusíveis.

Algumas vantagens do uso da chave seccionalizadora em conjunto com os religadores segundo [31] são:

- Por não possuir curvas características *tempo x corrente*, não são necessários estudos de curvas, o que simplifica os estudos de coordenação da proteção.
- Possibilidade de aplicação entre dois dispositivos de proteção que apresentam curvas *tempo x corrente* e que não há a possibilidade de instalação de um outro dispositivo também com esta característica por perdas de coordenação;
- Rápida normalização do sistema devido ao fácil rearme de seus contatos;
- Desligamento tripolar simultâneo, em contrapartida ao elo fusível que isola monofasicamente;
- Flexibilidade operacional pela possibilidade de operação como chave de manobra sob carga.

Como já dito, esta chave funciona associada ao religador para a interrupção de faltas por não eliminar a corrente de defeito. Entretanto, ela é capaz de interromper correntes até sua corrente nominal, o que permite sua utilização como chave de manobra para seccionamento manual sob carga.

3.1.1.4 Disjuntor

Os disjuntores são dispositivos projetados para conduzir e interromper correntes em condições normais e também em condições anormais por um tempo determinado. São equipamentos que, para a função da proteção, devem ser associados à relés que identificam o defeito e enviam, de acordo com seus ajustes, o comando de abertura para o disjuntor [5].

Para que se possa especificar corretamente o disjuntor a ser utilizado, é necessário que se considere diversas características, sendo as principais [31]:

- Capacidade de ruptura: Capacidade de interromper a corrente elétrica sem causar danos aos contatos; expressa em kVA;
- Tensão nominal: Tensão pelo qual o disjuntor foi projetado e construído, que determina as características dos isoladores, afastamentos, etc. Ela deve ser igual à tensão máxima de operação do sistema na qual o disjuntor é previsto operar;

- Intensidade de corrente nominal: É a corrente que deve circular permanentemente no disjuntor sem causar aquecimentos excessivos;
- Capacidade de fechamento: Capacidade de fechar o circuito, expressa em kVA;
- Contatos: é a intensidade de corrente nominal que determina a seção dos contatos.

A interrupção de uma corrente é dada pela abertura dos contatos que estão conduzindo esta corrente elétrica, mas com a separação dos contatos há a formação de um arco elétrico, que deve ser extinto o mais rápido possível. Os tipos construtivos de disjuntor dependem dos meios que são utilizados para a extinção do arco elétrico, são eles [5][31]:

- Disjuntores a óleo;
- Disjuntores a sopro magnético;
- Disjuntores a vácuo;
- Disjuntores a SF_6 ;
- Disjuntores a ar comprimido.

3.1.1.5 Relé de Sobrecorrente

Os relés em geral são equipamentos que funcionam como sensores que monitoram a operação do sistema elétrico. Sua função primordial é identificar os defeitos, localizá-los e alertar ao operador do sistema, tendo algumas vezes o disparo sonoro de alarmes ou, como é o caso da proteção de alimentadores, enviando comandos de abertura para o disjuntor para isolar o defeito [16].

Durante décadas os relés eletromecânicos eram únicos e absolutos no comando dos sistemas de proteção, mas com o avanço da tecnologia surgiram os relés eletrônicos (que tiveram um período curto de utilização) e em seguida os relés digitais apareceram apresentando diversas vantagens como maior velocidade, melhor sensibilidade, interface amigável, acesso remoto, armazenamento de informações, etc. Atualmente os relés digitais dominam o setor elétrico de potência, mas todos os relés possuem as mesmas características funcionais e mesmos

requisitos básicos. As grandezas de entrada são iguais para os três tipos de relés, que são analógicas oriundas dos equipamentos de medição (Transformadores de Corrente - TC e Transformadores de Potencial - TP), entretanto, nos digitais elas são convertidas em sinais digitais para então serem processadas pelos microprocessadores [5]. Outra grande vantagem dos relés digitais é a possibilidade de implementação de ferramentas inteligentes, como é o caso da proposta do presente trabalho.

Os relés de sobrecorrente são amplamente utilizados na proteção de elementos do sistema de potência como transformadores, linhas de transmissão, etc. Sua utilização é geralmente combinada com outros equipamentos de proteção, como quando aplicado na proteção de alimentadores, onde são associados tanto religadores quanto fusíveis. Já na proteção de linhas de transmissão e sistemas de distribuição em anel os relés de sobrecorrente são combinados com o relé direcional para oferecer a correta proteção para este tipo de sistema.

O relé de sobrecorrente atua quando por ele passar uma corrente maior que seu ajuste. Sua atuação pode ser instantânea (Relé de Sobrecorrente Instantâneo - 50) ou temporizada (Relé de Sobrecorrente Temporizado - 51) por tempo definido ou tempo inverso.

O *pickup* é o menor valor da corrente ajustada que passa pelo relé que inicia sua operação. No caso da unidade instantânea, quando a corrente sentida pelo relé ultrapassar o *pickup* ajustado, o relé atua. Já para o tempo definido, para uma corrente acima da corrente de acionamento haverá um tempo para a sua atuação, mas para qualquer valor de corrente este tempo será o mesmo. Para a atuação temporizada por tempo inverso são observados basicamente dois parâmetros: o dial de tempo (mais usualmente utilizado o termo em inglês *Time Dial* - TD), e o tipo de curva de tempo inverso do relé. O TD é escolhido de acordo com a temporização desejada, sendo que este indica a curva de atuação do relé de acordo com os múltiplos de *pickup* (quantas vezes a corrente sentida é maior que a de ajuste) versus o tempo de atuação. Este ajuste que torna a atuação do relé mais ou menos rápida. A curva de tempo inverso do relé pode ter diferentes declividades, sendo as mais usuais a normal inversa, muito inversa ou extremamente inversa. Essa curva expressa as características de resposta do relé em função dos múltiplos de *pickup* versus o tempo de atuação, para cada TD. Na Figura 3.5 podem ser verificados 5 exemplos de curvas de atuação de relés temporizados.

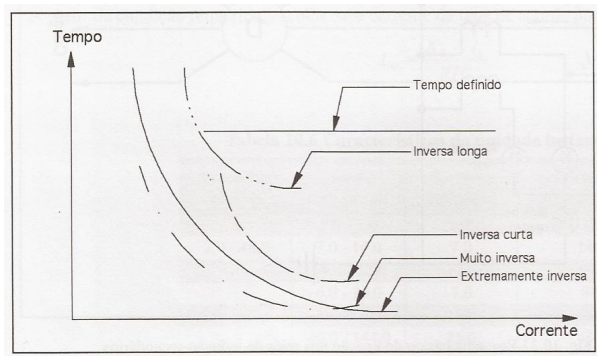


Figura 3.5 – Exemplos de curvas de relés temporizados [5].

3.2 IMPACTOS NA COORDENAÇÃO DE RELÉS DE SOBRECORRENTE NA PROTEÇÃO DOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO RADIAIS COM A INSERÇÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Os relés de sobrecorrente são coordenados para oferecer proteção de retaguarda ao elemento vizinho, mas a seletividade desejada deve ser mantida. Por isso, esses relés são coordenados em pares, chamados de relés primários e de retaguarda. O relé primário pode ter mais de um relé de retaguarda, e cada par de relé primário e de retaguarda deve ser coordenado. Na coordenação de relés de sobrecorrente, o uso da mesma curva de tempo inverso com diferentes TDs para ajustar os relés que já estão coordenados para a máxima corrente de falta, garante que em casos de faltas com correntes menores eles estarão também coordenados [16].

A Figura 3.6 mostra um alimentador protegido pelos relés R1, R2, e R3 e sua coordenação é ilustrada na Figura 3.7. Para uma falta na linha 3, os 3 relés sentem a mesma corrente, mas para garantir a seletividade, R3 deve operar primeiro e R2 deve oferecer a proteção de retaguarda com um tempo de operação maior que R3, e R1 garante a proteção de retaguarda para R2 da mesma forma. O intervalo de tempo de operação para a coordenação deve considerar fatores como tempo de abertura dos disjuntores, atrasos de equipamentos e uma margem de segurança, sendo que para relés digitais um tempo de coordenação de 200 ou 300 ms é geralmente utilizado [32].

Para explorar as diferenças na coordenação da proteção, 2 unidades de geração distribuída foram adicionadas ao sistema conforme

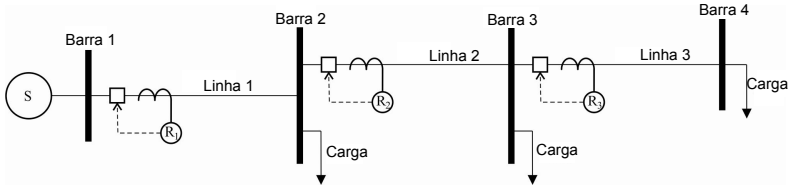


Figura 3.6 – Proteção de linhas de distribuição com relés de sobrecorrente em sistemas tradicionais.

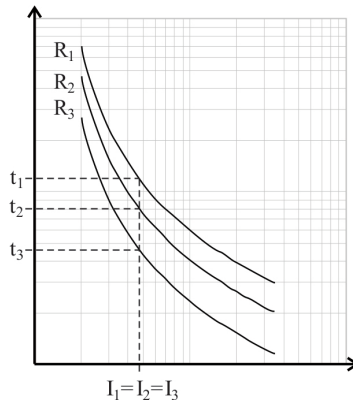


Figura 3.7 – Coordenação de relés de sobrecorrente em sistemas tradicionais.

mostrado na Figura 3.8.

Uma das mudanças com a adição da GD é que há uma redistribuição do fluxo e há agora a possibilidade de fluxo bi-direcional no alimentador, e com isso relés direcionais tornam-se necessários. Além disso, a corrente de falta que é sentida pelos relés não é apenas maior, o que implica mudança nos ajustes, mas também a corrente que passa por cada relé depende da localização da falta e então os valores podem ser diferentes uns dos outros. É válido lembrar que correntes de falta dependem das capacidades de geração de cada unidade.

Para observar alguns possíveis problemas de coordenação, é suposta uma falta na linha 3 (ou qualquer outro ponto à montante). Devido à existência do GD1 o relé R3 sentirá uma corrente maior que R1 e R2 (que nesta situação sentem a mesma corrente) e o esquema de operação pode ser verificado na Figura 3.9. Neste caso, o único problema ocorre na proteção de retaguarda do R3, que se falhar, R2 levará

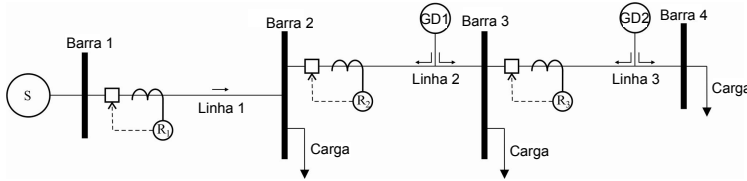


Figura 3.8 – Proteção de linhas de distribuição tradicional com relés de sobrecorrente com adição de geração distribuída.

muito tempo para operar, mas isto é facilmente ajustável. Entretanto, se uma falta ocorre na linha 1 o relé R1 sentirá uma corrente maior vinda do sistema principal, seguido do relé R2 que sente a corrente das unidades GD1 e GD2 e por último R3 que sente apenas a corrente gerada por GD2. Neste caso, como pode ser visto no esquema da Figura 3.10, R1 opera primeiro, mas para o isolamento da falta pela geração distribuída, o relé R3 opera antes de R2, o que demonstra uma falta de coordenação.

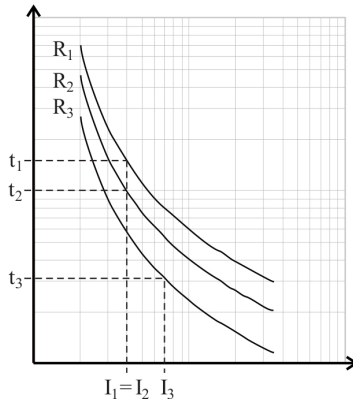


Figura 3.9 – Atuação dos relés de sobrecorrente no caso de falta na linha 3.

O aumento do número de unidades de GD e consequentemente o aumento de possibilidades de correntes de falta força uma diminuição na velocidade do tempo de operação dos relés para que se mantenha a coordenação. Além disso, em alguns casos, com a diversidade de situações a serem consideradas, a coordenação se torna muito complexa ou até mesmo impossível de ser alcançada em todos os pontos do sis-

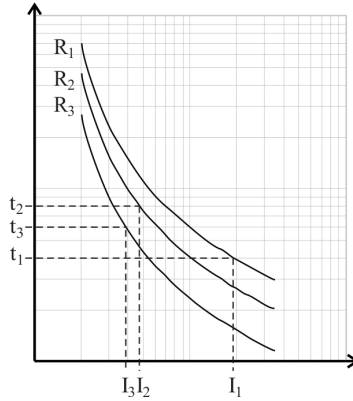


Figura 3.10 – Atuação dos relés de sobrecorrente no caso de falta na linha 1.

tema o que compromete a seletividade.

3.3 CONCLUSÕES

A característica do fluxo de potência unidirecional dos sistemas de distribuição radiais sem a presença de geração distribuída possibilita que a proteção tradicional seja mais simples e econômica. Isso porque os equipamentos não necessitam verificar a direcionalidade das correntes de falta, e também para a sua coordenação os estudos precisam ser feitos apenas considerando uma contribuição para as faltas. Entretanto, quando se insere uma ou mais unidades de GD, o fluxo de potência passa a ser bidirecional e modifica as correntes de curto-circuito. Essas mudanças afetam a coordenação da proteção pré-existente e muitas vezes implicam na necessidade de substituição de equipamentos. Os relés de sobrecorrente digitais, que são utilizados em conjunto com os disjuntores, possibilitam a aplicação de técnicas de inteligência artificial, o que permite o uso do SMA proposto neste trabalho para a solução de problemas atuais e serve como uma alternativa para problemas futuros.

4 SISTEMAS MULTIAGENTES

Pesquisas na área de Inteligência Artificial sempre proporcionaram grandes contribuições para resolução de problemas e melhorias em sistemas de potência, entretanto, alguns desses problemas possuem características que se tornam barreiras para soluções tradicionais ou as limitam, como por exemplo, grande complexidade, escalabilidade e flexibilidade. Com isso, novos ramos de pesquisa surgiram para lidar com estes limites, entre eles a Inteligência Artificial Distribuída (IAD) que visa resolver problemas de uma forma descentralizada. Desta forma, tanto o problema pode ser subdividido e distribuído entre as entidades para que cada um resolva uma parte, ou a solução surge da junção de conhecimento de cada entidade para resolver um único problema mais complexo.

Estudos recentes de IAD têm se concentrado nos Sistemas Multiagentes e aliado à evolução tecnológica, esta abordagem tem se mostrado bastante promissora para lidar com os atuais desafios. Na área de sistemas de potência muitas pesquisas estão sendo feitas tanto para melhorar o desempenho de sistemas em determinadas tarefas, diagnósticos de faltas por exemplo, como para criar soluções para problemas futuros, que é o caso das *smart-grids*.

Neste capítulo será feita uma revisão de conceitos importantes para o entendimento dos Sistemas Multiagentes com uma explanação do que são, para o que servem, como funcionam e como são criados. Com isso é possível uma melhor percepção do trabalho que foi desenvolvido utilizando esta abordagem.

4.1 O QUE SÃO AGENTES

Não existe uma definição universalmente aceita para o termo agente dentre os diversos autores da área de Inteligência Artificial Distribuída (IAD), isso porque esta definição está diretamente relacionada com a sua aplicação. Alguns conceitos são apresentados a seguir:

Segundo [33], um agente é qualquer entidade que perceba um ambiente através de sensores, execute tarefas de processamento de informações e de conhecimento e atue sobre o ambiente através de atuadores. Nesta definição a noção de ambiente, sensores e atuadores é muito vaga e permite interpretar qualquer programa computacional como sendo um agente se considerado que receber entrada está associ-

ada a qualquer ação sensorial e produzir saída como qualquer ação de atuação no mundo. Todos os agentes de *software* são programas computacionais, mas nem todos os programas computacionais são agentes [34]. Para que seja possível diferenciar agentes de outros programas computacionais faz-se necessário a definição de algumas propriedades fundamentais em um agente.

Em [35] a definição de agentes é dividida em noção fraca e noção forte de agentes. Na noção fraca o agente é um hardware ou (mais usual) *software* que possui as seguintes propriedades:

- Autonomia: os agentes operam sem uma intervenção direta do usuário e possuem em algum nível o controle sobre suas ações;
- Habilidade social: os agentes interagem com outros agentes através de uma linguagem de comunicação de agentes (*agent communication language* – ACL);
- Reatividade: os agentes percebem o seu ambiente (seja ele físico ou virtual) e reage a ele.
- Pró-atividade: os agentes além de reagir ao ambiente também são capazes de tomar a iniciativa para realizar sua tarefa de acordo com seus objetivos.

A noção forte é mais utilizada por pesquisadores na área de Inteligência Artificial (IA) que trata um agente de uma forma mais humana, possuindo propriedades como conhecimento, crenças, intenções e obrigações além das propriedades já citadas acima.

Já [36] define um agente como sendo “uma entidade criada para realizar uma tarefa ou um conjunto de tarefas” e em seguida afirma que qualquer propriedade do agente deve ser definida de acordo com a sua tarefa e seu ambiente e desta forma ser capaz de analisar o sucesso ou não do agente para assim caracterizá-lo. Além das características consideradas fundamentais ainda existem outros atributos que podem existir em um agente [35]:

- Mobilidade: habilidade de um agente de se mover entre diferentes pontos de uma rede de computadores;
- Confiabilidade: garantia de que este agente não irá fornecer uma informação falsa;
- Benevolência: assume-se que os agentes não possuem objetivos conflitante e por isso cada agente sempre tentará realizar a sua tarefa;

- Racionalidade: sempre age para atingir seus objetivos e nunca para não alcançá-los e pode aprender com experiências passadas e adaptar-se a novos ambientes.

A racionalidade é outro ponto controverso nas definições principalmente para caracterizar um agente inteligente. Isso porque não há consenso sobre o que é inteligência e assim não se define o que é necessário em um agente para que seja chamado de inteligente. Para Wooldridge em [37] um agente que possui reatividade, pró-atividade e habilidade social, sendo estes três atributos o seu conceito de flexibilidade, é considerado inteligente.

Quanto maior o número de propriedades possuídas por um agente, maior é sua complexidade e sofisticação, mas comparações entre agentes devem ser feitas apenas considerando o mesmo domínio de aplicação. Isso porque uma propriedade que para uma situação é fundamental, em outra pode ser desnecessária ou até mesmo indesejável.

4.2 CLASSIFICAÇÃO DE AGENTES

Existem diversas formas de classificação de um agente sendo uma das principais a análise de seu comportamento através do seu funcionamento interno em que são classificados como agentes reativos e cognitivos.

Agentes reativos possuem um modelo de funcionamento de estímulo-resposta, sendo sua principal característica o fato de que não raciocinam sobre o mundo, tendo suas ações derivadas apenas da percepção do ambiente e um conjunto fixo de regras conforme pode ser observado na Figura 4.1 baseada na ideia de Russel. Além disso, agentes reativos não possuem memória, não planejam ações futuras, são em grande quantidade e pouco interagem entre si, o que simplifica a coordenação entre eles [38].

O segmento de pesquisa da IA conhecida como Inteligência de Enxames (*Swarm Intelligence*) se baseia no comportamento do conjunto de agentes reativos baseados em modelos de organização biológica, em que individualmente cada entidade não é considerada inteligente, mas quando analisado o coletivo se vê um comportamento de inteligência global, como pode ser observado em colônia de formigas ou cardumes [39].

Já os agentes cognitivos são capazes de raciocinar sobre o mundo, pois possuem uma representação explícita do ambiente e dos outros agentes e também possuem memória e com isso são capazes de pla-

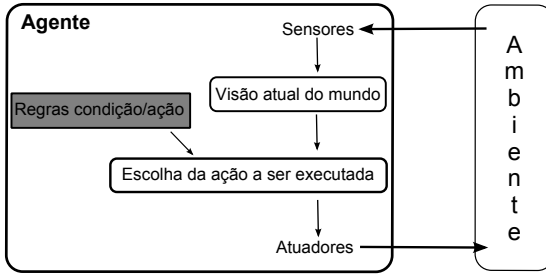


Figura 4.1 – Agente reativo [6]

nejar suas ações futuras [38]. Estes agentes percebem a informação obtida do ambiente e também dos outros agentes e, utilizando o conhecimento já adquirido, raciocinam e julgam essas informações. Com isso, tomam a decisão de sua ação, respondendo para outros agentes cognitivos ou para o ambiente externo. Além disso, aprendem com essas novas informações [40]. Na Figura 4.2 é mostrado um modelo de agente cognitivo.

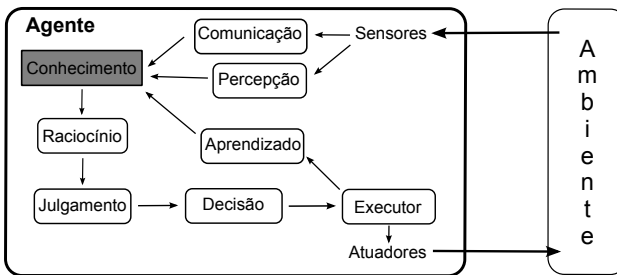


Figura 4.2 – Agente cognitivo

Não se pode afirmar qual dos dois tipos é o melhor, pois isto muito depende da aplicação, por exemplo, se um carro está em alta velocidade e um pedestre atravessa em sua frente, a reação ideal é que o carro seja freado o mais rápido possível, não que sejam analisadas várias possibilidades para que depois seja tomada uma decisão, pois pode ser tarde demais. Assim, um dos desafios de projeto de um SMA é encontrar o equilíbrio entre rapidez, obtida com agentes puramente reativos, e qualidade de resposta, obtida com agentes puramente cog-

nitivos.

Essas características são dois extremos, entretanto deve ser observado que em sua grande maioria os agentes situam-se entre estes conceitos, ou seja, possuem características tanto reativas quanto cognitivas em algum nível. Uma das formas de unir estes comportamentos é, segundo Wooldridge, através de agentes híbridos que possuem sua estrutura dividida em camadas de comportamentos organizados de uma forma hierárquica, que pode ser tanto horizontal quanto vertical [7].

Na estrutura de camadas horizontal, mostrada na Figura 4.3 cada camada está ligada diretamente aos sensores de entrada e atuadores de saída, onde basicamente cada camada atua como um agente o que é útil quando se deseja diversificados comportamentos para uma situação. Essa estrutura possui a vantagem da simplificação de cada agente, entretanto pode haver conflito entre os comportamentos impedindo que o agente manifeste um comportamento coerente. Para lidar com este problema é criada uma função mediadora no agente, que irá determinar uma camada de controle para determinada situação, o que aumenta a complexidade de projeto do agente, pois é necessário analisar todas as possíveis interações entre os comportamentos de todas as camadas [7].

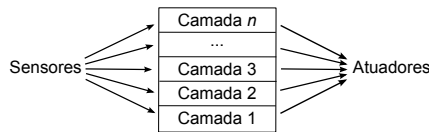


Figura 4.3 – Estrutura horizontal em camadas [7]

Já na estrutura em camadas vertical apenas uma camada possui o sensor de entrada e outra o atuador de saída conforme Figura 4.4 (a) (no caso de controle em dois passos seria a mesma camada 4.4(b)). Para o caso do controle em um passo o fluxo de controle segue sequencialmente da primeira camada até a última que irá atuar. No controle de dois passos inicialmente o fluxo de informações segue sequencialmente em um sentido e em seguida o fluxo de controle retorna para que a camada inicial atue. Neste tipo de estrutura o número de interações com que o projetista precisa se preocupar é bastante reduzido, pois neste caso cada camada só interage com no máximo 2 camadas. Entretanto, como o fluxo de comandos necessita necessariamente passar por todas as camadas esse modelo é crítico, pois não possui redundância, ou seja, caso uma das camadas vir a falhar, o comportamento do agente fica

altamente comprometido [7].

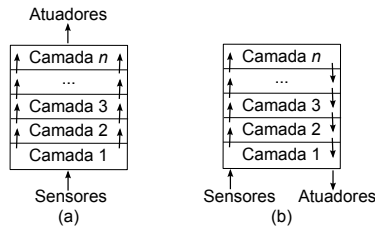


Figura 4.4 – Estrutura vertical em camadas [7]

Também podem ser divididos em agentes de *software* ou *hardware*. Os agentes de *hardware* estão relacionados a componentes físicos como sensores, atuadores e ferramentas e seu comportamento segue estritamente sua função de satisfação (fixa) e de acordo com seus recursos. Normalmente estes agentes servem de interface dos agentes de *software* com o meio externo. Os agentes de *software* possuem um conjunto dinâmico de objetivos e normalmente possuem conhecimento parcial dos demais agentes o que faz com que seu comportamento seja em função não apenas dos seus recursos, mas também das informações que este possui dos demais agentes.

Outra forma de classificação é quanto sua mobilidade, sendo eles denominados móveis ou estáticos. Segundo [41] agentes móveis são agentes de software que possuem a capacidade de se mover de um ambiente para outro. Uma das grandes vantagens destes agentes é a possibilidade de obter um grande número de informações sem a necessidade de sobrecarregar a rede de comunicação do sistema. Além disso, o agente pode escolher o melhor ambiente para executar suas tarefas, por exemplo, um computador com melhor capacidade de processamento. Entretanto, com essa liberdade cria-se o problema de falta de segurança por deixar um agente externo entrar no sistema, por exemplo, um agente disseminador de vírus. Agentes estáticos são agentes de *software* que quando inseridos em um ambiente computacional não possuem a capacidade de se moverem para outros computadores.

Conforme já mencionado, as características de um agente dependem diretamente de sua aplicação, ou seja, como este agente deve atuar conforme uma determinada situação. A complexidade envolvida neste processo é ditada principalmente pelo ambiente em que se encontra o agente. Segundo Russel, os agentes atuam no ambiente e este responde com (provendo) percepções aos agentes, e estes ambientes podem ser

classificados de acordo com as seguintes características [33]:

- **Acessível ou inacessível:** um ambiente é acessível se o agente é capaz de obter todas as informações necessárias para que ele possa realizar suas tarefas e tomar suas decisões através de seus sensores.
- **Determinístico ou não-determinístico:** um ambiente é chamado determinístico se o seu próximo estado é totalmente determinado pelo seu estado atual e ações dos agentes, ou seja, sabe-se qual será o resultado de uma determinada ação.
- **Episódico ou não-episódico:** em um ambiente episódico o desempenho do agente é dividido em episódios momentâneos, ou seja, o momento em que é percebido o evento e então há a atuação. Neste caso o agente fica simplificado, pois suas ações não dependem do passado e nem é necessária a preocupação com o futuro.
- **Estático ou dinâmico:** um ambiente em que não haja alterações além das realizadas pelo agente é considerado estático. Em um ambiente dinâmico ocorrem mudanças independentemente das ações dos agentes, sendo estes ambientes de maior complexidade, pois o agente deve ser projetado com a capacidade de adaptação a estas mudanças.
- **Discreto ou contínuo:** um ambiente discreto é aquele que possui um número fixo e finito de ações e percepções possíveis, como por exemplo o jogo de xadrez, enquanto dirigir um táxi é considerado um ambiente contínuo.

4.3 OS SISTEMAS MULTIAGENTES

Inicialmente a Inteligência Artificial (IA) possuía o foco de suas pesquisas em como um único agente seria capaz de resolver problemas através de heurísticas ou base de conhecimentos possuindo assim um comportamento chamado inteligente. Com o avanço tecnológico possibilitando a concorrência entre computadores ou mesmo a expansão para redes de computadores com multi-nós distribuídos e a percepção de que muitas soluções são alcançadas com grupos de pessoas uma nova área da IA foi desenvolvida, a Inteligência Artificial Distribuída, onde são desenvolvidos métodos de IA para a solução distribuída de problemas através de coordenação e concorrência [42].

Uma das principais razões para que seja utilizada a distribuição de sistemas inteligentes é o fato de que diversos problemas possuem naturalmente uma característica distribuída, como por exemplo controle de tráfego aéreo, ou mesmo quando o problema consiste em um conjunto heterogêneo de subproblemas, como o projeto de produtos industriais, onde cada especialista é responsável por uma parte do todo e seus conhecimentos são agregados para uma melhoria do produto final. Além disso, existe o problema de grande complexidade onde só é possível alcançar a solução através de uma separação deste em subproblemas e assim analisá-los. Outros motivos são [38][43]:

- Melhoria da adaptabilidade e autonomia. Devido a distribuições lógica, temporal e espacial, o sistema possui maior liberdade para lidar com situações emergentes, adaptando-se melhor às mudanças no sistema. Além disso, a separação de partes do sistema requer um controle e individualidade maior para cada parte.
- Aumento da confiabilidade. Sistemas distribuídos geralmente possuem maior confiabilidade perante sistemas centralizados devido a redundância existente nesta “topologia”, além desta não depender essencialmente do sucesso de uma parte central do sistema.
- Redução dos custos de desenvolvimento e manutenção. Os computadores são mais simples e com custo mais baixo. Também, cada parte poder ser desenvolvida separadamente, ou seja, não é necessário um especialista de todas as áreas envolvidas no sistema, apenas da entidade em questão.
- Aumento da eficiência e da velocidade. O número de tarefas realizáveis pode ser aumentado através do compartilhamento de recursos (informações, conhecimento, recursos físicos, etc.), além de maior agilidade com a aplicação do paralelismo.

Para a aplicação da IA Distribuída é necessário [42]:

- Formular, descrever, decompor, designar, alocar problemas e sintetizar resultados em um grupo de agentes inteligentes para que se possa projetar o sistema a ser implementado.
- Definir como será a comunicação entre os agentes de maneira a permitir uma interação eficiente.
- Garantir uma atuação coerente do agente de acordo com suas decisões e ações e evitar interações indesejadas.

- Permitir que cada agente seja capaz de raciocinar a respeito das ações e conhecimentos dos outros agentes para que haja coordenação e cooperação (quando desejado) entre eles.
- Reconhecer e tomar alguma decisão diante de diferentes pontos de vista e interesses dos diversos agentes que buscam a coordenação.

Estes são aspectos que devem ser considerados em qualquer aplicação de IAD sendo diretamente relacionados ao domínio da aplicação e consequentemente suas soluções.

A IAD pode ser subdividida em dois principais ramos: Solução Distribuída de Problemas (SDP) e Sistemas Multiagentes (SMA). O primeiro considera que existe um problema que deve ter sua solução distribuída entre os agentes do sistema, que são programados para cooperar, dividir tarefas, comunicar-se de maneira confiável, compartilhar conhecimento sobre o problema e assim solucioná-lo, ou seja, cada agente pode contribuir para a solução global do problema. Os SDP têm o objetivo de solucionar problemas naturalmente e fisicamente distribuídos ou que possuem uma complexidade muito elevada e para isso utilizam a capacidade de processamento existente na tecnologia de redes. Em um sistema SDP a qualidade é medida pelo desempenho global deste sistema considerando a solução de um problema específico [38].

Nos SMA o foco é o comportamento do agente, seus conhecimentos e como estes são coordenados com seus objetivos e habilidades para planejar em conjunto como agir ou resolver o problema. Os agentes no SMA podem tanto estar trabalhando para resolver um problema global ou, diferentemente dos sistemas SDP, cada agente trabalhando em seu próprio objetivo, mas estes interagem e interferem entre si [42]. Entretanto, dependendo do domínio do problema essa distinção não é evidente não existindo assim uma padronização atual desses conceitos.

4.4 INTERAÇÃO ENTRE AGENTES

Conforme já mencionado, um agente precisa possuir a habilidade de se comunicar com outros agentes para que um sistema multiagente possa funcionar corretamente. Essa comunicação deve ser organizada de forma que respeite e auxilie os agentes nas suas tarefas, ou seja, ela deve ser coordenada de acordo com seus objetivos e deveres. A Figura 4.5 apresenta as diferentes formas de coordenação.

A cooperação é, no geral, uma coordenação entre agentes que não possuem conflitos em seus objetivos, e que envolve um planejamento

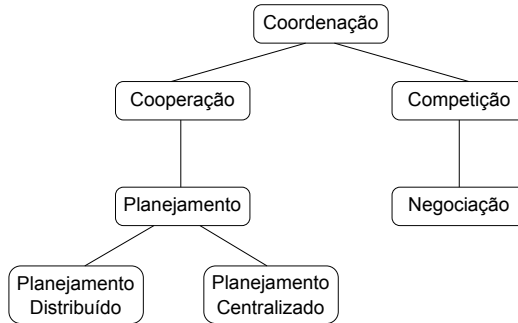


Figura 4.5 – Coordenação de agentes [8]

de tarefas complementares. Já a competição é uma coordenação entre agentes competitivos ou mesmo agentes que estão interessados apenas nos seus objetivos, o que implica em negociação entre os agentes.

Casos de negociação seriam, por exemplo, um leilão de uma pesquisa de um agente por um determinado serviço procurando a melhor oferta de preço oferecida por cada agente que provê o serviço, onde cada agente de serviço visa conquistar o cliente enquanto que o cliente usa desta competição entre os agentes para alcançar um preço melhor. Numa mesma situação de cliente e prestador de serviço, também pode haver uma negociação apenas entre os dois agentes, onde os objetivos conflitantes do cliente querendo minimizar seus gastos e o prestador de serviços aumentar seus lucros ficam bastante claros.

Já no caso de cooperação não há competição entre os agentes. Um exemplo seria na construção de uma casa e cada agente é responsável por uma tarefa específica (fundação, hidráulica, elétrica, acabamento, etc.) para que no final o objetivo de ter a casa pronta em menor tempo possível seja alcançado. Como existem diversas dependências de uma etapa estar pronta para que a outra comece, mas também existem tarefas que podem ser executadas paralelamente o sucesso dessa operação exige um bom planejamento e forte cooperação entre os agentes tanto na execução de tarefas quanto na comunicação.

4.5 TIPOS DE ORGANIZAÇÃO

Além da definição da arquitetura interna de cada agente, em um sistema multiagente é importante que se defina de maneira correta a

organização deste sistema, pois com ela serão definidas as estratégias de interação dos agentes como a comunicação e coordenação. A seguir serão apresentados alguns dos principais tipos de organização segundo [44].

4.5.1 Hierárquica

A organização hierárquica é uma estrutura tipo “árvore” conforme pode ser visto na Figura 4.6. Neste tipo de estrutura há comunicação entre os agentes de um mesmo ramo, e quanto mais acima é a posição do agente, maior é seu poder e mais global é sua visão do sistema.

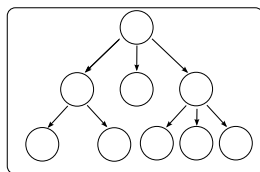


Figura 4.6 – Organização hierárquica

Os agentes das camadas inferiores possuem um conhecimento mais restrito do sistema, sendo que suas tarefas são delegadas pelos agentes das camadas superiores que possuem maior capacidade de processamento ou maior inteligência. O fluxo dos dados produzidos pelos agentes é geralmente da camada inferior para a superior (oferecendo uma visão mais ampla), enquanto que o fluxo de comandos é na direção oposta. Esse tipo de estrutura tem sua eficiência derivada da possível decomposição natural de tarefas em um ambiente e também da divisão de forma a alocar tarefas simples a agentes de menor complexidade e tarefas com grau mais elevado de dificuldade para agentes mais capacitados, como é o caso de uma fábrica.

Uma das vantagens da estrutura hierárquica é o baixo fluxo de mensagens, e a consequente simplificação da interação entre os agentes, visto que ela está limitada a no máximo dois tipos: com a camada inferior e com a camada superior. Entretanto isto pode se tornar um problema quando as informações demoram muito tempo para chegar aos seus destinos devido ao grande número de camadas e, portanto, processamento de mensagens existentes. Além disso, a dependência imposta por este tipo de estrutura torna o sistema frágil, pois a falta

de um agente das camadas superiores afetaria de forma significativa o sistema, ou até mesmo impossibilitando o seu funcionamento até que este seja substituído.

4.5.2 Times

Quando os agentes são organizados em um time significa que estes possuem um objetivo em comum e que irão colaborar entre si para atingir o objetivo global visando a maximização do desempenho do grupo e não individualmente. A diferença entre essa organização e qualquer outra organização cooperativa é que nesta há uma definição específica de quais os objetivos compartilhados e planos específicos do time. Na Figura 4.7 pode ser observado que tanto o tipo quanto o padrão de interação entre os agentes podem ser totalmente arbitrários, entretanto cada agente será responsável por uma ou mais tarefas que ajudarão a resolver o objetivo do time.

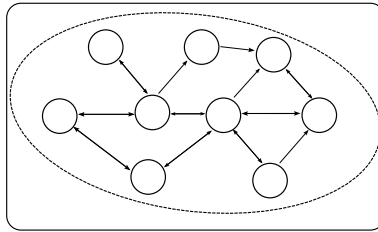


Figura 4.7 – Organização em times

Uma das vantagens deste modelo é a redundância existente, visto que as tarefas podem ser facilmente realocadas e não há uma dependência forte entre os agentes. Entretanto, a flexibilidade existente pela possibilidade de comunicação entre todos os agentes aumenta o fluxo de comunicação e também a complexidade de interações dos agentes, pois cada agente deve estar preparado para interagir com qualquer agente.

4.5.3 Organização baseada em coalisção

Uma organização baseada em coalisção geralmente é temporária e direcionada a um objetivo, pois a coalisção é feita para atingir uma meta,

e quando esta é atingida a união se desfaz. Conforme pode ser visto na Figura 4.8, a estrutura organizacional dentro de cada coalisção é plana, embora possa haver um agente agindo como representante do grupo. O uso deste tipo de organização é motivado pelo poder da massa, em que um grupo de agentes possui muito mais poder que um único agente.

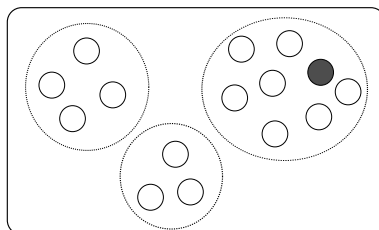


Figura 4.8 – Organização baseada em coalisção

4.5.4 Congregações

As congregações de agentes, assim como coalisções e times, são formadas por agentes que se uniram em uma estrutura plana com a finalidade de aumentar seus benefícios. Entretanto sua diferença é que são uniões a longo prazo e não são formadas com um único objetivo, ou seja, são uniões de agentes que possuem características em comum ou complementares com a finalidade de obter mais recursos dos agentes participantes do grupo. Na Figura 4.9 são mostradas congregações em que as diferentes cores representam a heterogeneidade que pode haver entre as diferentes congregações, diferentemente da homogeneidade das coalisções da Figura 4.8.

4.5.5 Sociedades

Através de nossa própria experiência como seres humanos é possível entender que sociedades são grupos de longo prazo e inerentemente abertos. Nas sociedades não se têm controle dos agentes que entram e saem e não existe relação entre eles, sendo que cada agente possui seus objetivos, tarefas e capacidades, embora estes podem formar subgrupos dentro da sociedade. Isso traz consequências como a necessidade da criação de leis para que haja ordem dentro da sociedade, sendo que

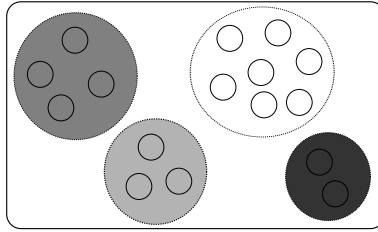


Figura 4.9 – Organização baseada em congregações

elas devem ser construídas de maneira a equilibrar os comportamentos dos agentes tomando o cuidado de não impedir que objetivos sejam alcançados. A Figura 4.10 ilustra que todos os agentes obedecem às mesmas normas enquanto fazem parte da mesma sociedade, já agentes que não pertencem a organização não estão ligados às leis até que entrem na sociedade. Uma das vantagens apontadas para o uso deste tipo de organização é que em sistemas muito complexos, a limitação imposta pelas leis da sociedade simplifica o comportamento de cada agente e também interpretações sobre o comportamento de um outro agente.

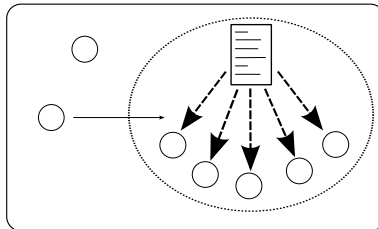


Figura 4.10 – Organização baseada em sociedades

4.5.6 Federações

Nos sistemas federados os agentes possuem características em comum e um agente dentro do grupo recebe certa autonomia para que seja o representante do grupo. Este agente, representado na Figura 4.11 por uma bola preta, é um membro distinto e é chamado também de

delegado, facilitador, mediador, etc... Os membros do grupo interagem somente com o facilitador e este é a conexão com o meio externo que também interage com os outros facilitadores das outras federações.

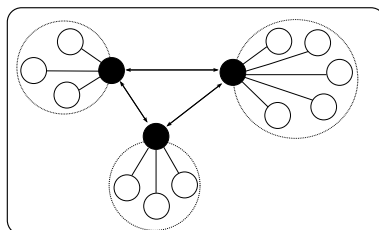


Figura 4.11 – Organização baseada em federações

Uma das vantagens neste tipo de arranjo é que o facilitador deve ser capaz de interagir com todos os agentes de sua federação e os outros mediadores, e para os outros agentes é necessário apenas a interação com seu facilitador. Isso diminui drasticamente a complexidade da interação dos agentes, sendo muito útil em sistemas altamente heterogêneos.

4.5.7 Organização Composta

Um sistema pode possuir características que não se encaixam exatamente em um determinado tipo de organização, sendo este uma composição de um ou mais tipos de arquiteturas. Na Figura 4.12 é mostrada uma organização composta por uma parte hierárquica e outra baseada em coalisção. As vantagens e desvantagens deste tipo de arranjo são derivadas daquelas que a compõem, entretanto podem surgir consequências inesperadas. Um exemplo seria se um facilitador de uma federação possuísse também um papel importante em outra organização e estas tarefas fossem conflitantes ou sobrecarregassem o agente.

4.6 COMUNICAÇÃO ENTRE AGENTES

A comunicação entre os agentes, para informar ações e enviar informações, pode ser feita de duas formas:

- Direta: os agentes se comunicam diretamente, sem a utilização

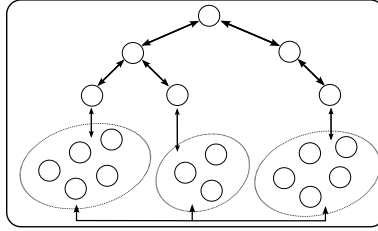


Figura 4.12 – Organização composta

de nenhuma estrutura ou entidade.

- Indireta: existe uma estrutura ou entidade intermediária entre os agentes quando estes se comunicam.

Uma das formas de comunicação indireta é a chamada *blackboard* (quadro-negro), na qual as mensagens são “expostas” em um espaço comum a todos, conforme Figura 4.13. Neste sistema as mensagens podem ser tanto abertas para que todos os agentes possam ter acesso ou limitadas a determinados agentes. Uma das vantagens é que se trata de um mecanismo flexível para comunicação/coordenação dos agentes, e diminui o volume de mensagens. Um exemplo é o pedido de uma tarefa, em que é necessário que o agente coloque apenas uma mensagem no quadro e assim todos podem ler, ao invés da mesma mensagem enviada individualmente para todos os agentes. Entretanto, isto representa uma fragilidade do sistema quando considerada uma falha neste ponto.

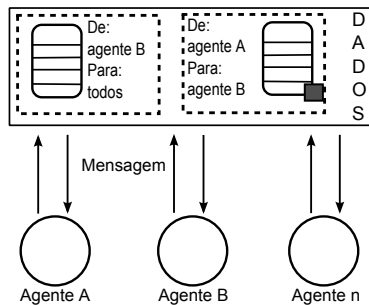


Figura 4.13 – Comunicação por *Blackboard*

Outra maneira indireta de comunicação é a chamada mediada, que é quando há um agente facilitador que pode ser tanto a única forma de comunicação entre os agentes (caso de organizações federadas) como também pode ser um agente que provê um serviço de apoio, por exemplo, como o serviço de páginas amarelas. Na Figura 4.14 é exemplificado o caso de comunicação exclusiva através do agente facilitador.

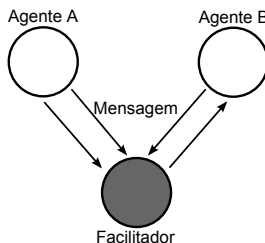


Figura 4.14 – Comunicação Mediada

A troca de mensagens direta entre agentes (Figura 4.15) exige que diversos requisitos sejam atendidos para que se tenha uma comunicação bem sucedida, isso devido a grande variedade de agentes e níveis de conhecimentos existentes, ou seja, a mensagem deve ser corretamente enviada e também compreendida. Para lidar com isso foram criadas algumas linguagens de comunicação entre agentes, *ACL agent communication languages*, sendo as mais usuais KQML e FIPA ACL. Essas linguagens são baseadas na Teoria dos Atos de Fala (*Speech Acts*), que trata a comunicação como uma ação e que agentes executam os atos de fala como qualquer outra ação e sempre de acordo com suas intenções [7]. A seguir será melhor descrita a Linguagem FIPA ACL que é a utilizada neste trabalho.

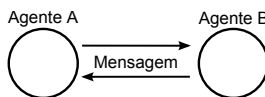


Figura 4.15 – Comunicação Direta

4.6.1 Linguagem FIPA ACL

A *Foundation for Intelligent Physical Agents*, FIPA, é uma organização internacional criada em 1996 com o objetivo de desenvolver e promover padrões para os agentes, como arquiteturas de sistemas multiagentes, protocolos de comunicação e linguagem de comunicação de agentes (FIPA ACL).

Conforme mencionado anteriormente, a linguagem FIPA ACL é baseada em atos de fala chamados de atos comunicativos (*communicative acts*), que são listados na Tabela 2.

Na estrutura de uma mensagem FIPA-ACL existem diversos parâmetros que serão ou não utilizados variando de acordo com a situação e necessidade para que haja uma comunicação eficaz entre os agentes. O único parâmetro obrigatório em uma mensagem é a performativa, embora seja esperado que as mensagens contenham também remetente, destinatário e conteúdo. Os parâmetros existentes estão na Tabela 3.

Um exemplo da estrutura básica de uma mensagem FIPA-ACL é mostrada a seguir:

```
(FIPA-ACL performative
:remetente<>
:destinatário<>
:ontologia<>
:linguagem<>
:protocolo<>
:conteúdo<>
...)
```

Dessa forma existe um ganho no planejamento das interações dos agentes, pois estas podem ser coordenadas de acordo com seus atos comunicativos. Além disso, há a possibilidade de filtragem de mensagens a serem analisadas em determinado momento utilizando um ou mais dos parâmetros como, por exemplo, determinando um remetente em específico.

Existem muitas situações em que um diálogo possui sua sequência de troca de mensagens já prevista, como quando se faz uma pergunta espera-se uma resposta. Assim foram criados alguns protocolos de comunicação, que são padrões de diálogos baseados em suas intenções, por exemplo o rede de contrato (*Contract Net*) que pode ser visto na Figura 4.16. Neste protocolo um agente (Iniciador) deseja que uma tarefa seja realizada por um ou mais agentes (Participante). O Iniciador então envia uma mensagem, *Call for Proposal - cfp*, para os partici-

Tabela 2 – Atos comunicativos [9]

Ato Comunicativo FIPA	Descrição
<i>Accept Proposal</i>	Aceitar uma proposta para realizar uma ação
<i>Agree</i>	Concordar em realizar uma ação, talvez no futuro.
<i>Cancel</i>	Um agente avisa ao outro que não mais deseja que este realize uma ação.
<i>Call for Proposal</i>	Realização de uma chamada para propostas de alguma ação.
<i>Confirm</i>	Remetente avisa ao destinatário que uma afirmação é verdadeira, quando o destinatário possui dúvidas disto.
<i>Disconfirm</i>	Remetente avisa ao destinatário que uma afirmação é falsa, quando o destinatário acredita o contrário.
<i>Failure</i>	Informar ao outro que uma ação foi realizada mas que houve falha na execução.
<i>Inform</i>	Remetente avisa ao destinatário que uma afirmação é verdadeira.
<i>Inform If</i>	Uma ação macro para o agente para informar o destinatário se a afirmação é verdadeira ou não.
<i>Inform Ref</i>	Uma ação macro permitindo que o remetente informe ao destinatário de algum objeto que corresponda a uma descrição específica (um nome por exemplo).
<i>Not Understood</i>	O remetente informa ao destinatário que não entendeu a ação que o destinatário executou.
<i>Propagate</i>	O remetente deseja que o destinatário trate as mensagens incorporadas como mandadas diretamente para o destinatário, e quer que ele identifique os agentes pelas descrições dadas e mande a mensagem recebida para eles.
<i>Propose</i>	Submeter uma proposta de alguma ação a ser executada segundo algumas condições.
<i>Proxy</i>	Remetente quer que o destinatário selecione determinados agentes de acordo com alguma descrição e mandar para eles uma determinada mensagem.
<i>Query If</i>	Perguntar para outro agente se uma afirmação é verdadeira ou falsa.
<i>Query Ref</i>	Pedir para outro agente um objeto referido por uma expressão referenciada.
<i>Refuse</i>	Recusar fazer uma determinada ação solicitada com explicação do porquê da recusa.
<i>Reject Proposal</i>	Rejeitar uma proposta de fazer alguma ação durante uma negociação.
<i>Request</i>	Remetente solicita ao destinatário uma determinada ação.
<i>Request When</i>	O remetente deseja que o destinatário execute uma ação quando uma afirmação for verdadeira.
<i>Request Whenever</i>	O remetente deseja que o destinatário execute uma ação assim que uma afirmação for verdadeira e a repita cada vez que ela retorne a ser verdadeira.
<i>Subscribe</i>	O ato de solicitar uma intenção persistente para notificar o remetente do valor de uma referência, e sempre avisar quando o objeto identificado pela referência mudar.

Tabela 3 – Parâmetros da mensagem ACL [9]

Parâmetro	Descrição
<i>Performative</i>	Tipo de ato comunicativo da mensagem.
<i>Sender</i>	Identidade do remetente.
<i>Receiver</i>	Identidade do(s) destinatário(s).
<i>Reply-to</i>	Qual agente para direcionar mensagens subsequentes nesta mesma conversação.
<i>Content</i>	Conteúdo da mensagem.
<i>Language</i>	Linguagem em que o conteúdo da mensagem está escrito.
<i>Encoding</i>	Codificação específica do conteúdo da mensagem.
<i>Ontology</i>	Ontologia utilizada para dar significado aos símbolos no conteúdo da mensagem.
<i>Protocol</i>	Protocolo de interação utilizada para dar estrutura à conversação.
<i>Conversation-id</i>	Identidade única de uma conversação.
<i>Reply-with</i>	Uma expressão a ser utilizada na resposta pelo agente para identificar a mensagem.
<i>In-reply-to</i>	Referência a uma ação passada da qual a mensagem é resposta.
<i>Reply-by</i>	Um hora/data indicando quando a resposta deve ser recebida.

pantes informando a tarefa a ser executada e solicitando uma proposta de execução, estipulando um prazo para o envio das respostas. Os participantes podem tanto enviar a proposta como podem recusar o serviço. O passo seguinte é o envio da mensagem do Iniciador para os Participantes que enviaram anteriormente uma proposta de aceita ou recusada. Daqueles que tiveram a proposta aceita, após o término da execução da tarefa, devem informar seu sucesso com uma mensagem de *inform-done*, ou uma mensagem mais completa de *inform-result*. Caso não consigam executá-la, uma mensagem de falha, *failure*, deve ser enviada.

4.7 APLICAÇÕES DE SMA EM PROTEÇÃO DE SISTEMAS DE POTÊNCIA

A natureza distribuída dos sistemas de potência faz com que os sistemas multiagentes sejam uma abordagem conveniente para a solução de diversos problemas em diferentes segmentos de áreas como planejamento, operação, proteção, etc. A seguir será feita uma pequena revisão de trabalhos importantes em alguns dos segmentos de proteção de sistemas de potência, que são o foco deste trabalho.

Um artigo pioneiro na área de coordenação da proteção de sistemas de potência com o uso de SMA é [45], onde é introduzido o conceito

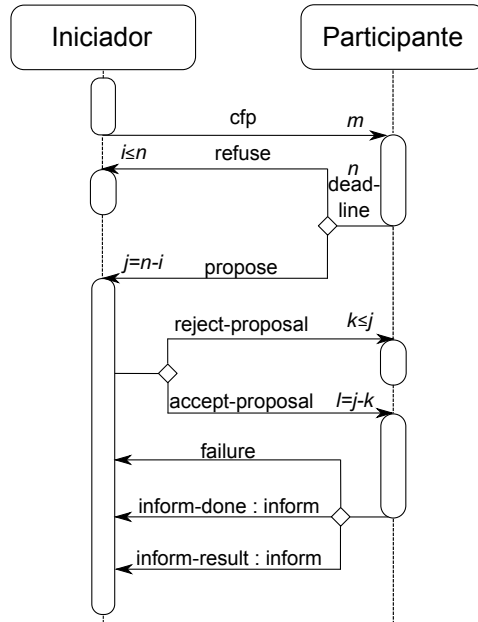


Figura 4.16 – FIPA *Contract Net-Protocol* [9]

de agentes relés e utiliza a cooperação entre estes para realizar diversas funções de proteção. Estas funções são: detecção de falta, isolamento da área faltosa, função de *backup* para falha de disjuntor e função adaptativa para disjuntor aberto (mudança na topologia). Para isso são criados quatro tipos principais de agentes: Equipamento, Móvel, Protetor e Reorganizador. Para a detecção de falta, agentes detectores (subgrupo de Agentes Protetores) calculam a diferença entre os valores medidos de corrente nas áreas supervisionadas através dos agentes coletores de dados (subgrupo de agentes móveis) e, caso seja detectada alguma diminuição de corrente, este agente decide que há necessidade de abertura de disjuntor. Assim, a função de isolamento é acionada, sendo que cada agente detector está relacionado com um agente isolador, onde este é responsável por isolar a menor área possível e realiza esta tarefa enviando o comando de abertura para os disjuntores da área a ser isolada através de uma cadeia de agentes. Após esta etapa é verificada a operação do disjuntor através do agente de abertura do disjuntor, e caso haja falha este procura por outro disjuntor para realizar a função de

backup que garanta o isolamento considerando deixar fora de operação a menor área possível. A função adaptativa para disjuntor aberto é acionada na mudança de topologia da rede através de um agente disjuntor que cria um agente adaptador que gera então uma nova área a ser supervisionada pelos agentes detector e isolador. Essa adaptação da topologia faz com que seja minimizada a área a ser isolada caso ocorra uma nova falta. Este trabalho apontou caminhos importantes para pesquisas futuras na área de proteção.

Seguindo esta linha, mais recentemente em [46] é proposto um sistema multiagente para proteção adaptativa da rede visando minimizar os danos causados pelo desligamento de equipamentos, considerando que com uma nova topologia da rede os ajustes pré-definidos dos relés não são mais válidos. Para isso o sistema MAWAPS (*WAN Based Adaptive Protection System*) possui agentes que monitoram o sistema e quando há algum evento de mudança de status este é detectado e um agente utiliza teoria de grafos e técnicas de inteligência artificial para analisar e atualizar a topologia da rede enquanto outro agente é encarregado de calcular uma nova matriz de impedância da rede. Com esses dados o agente responsável pelo cálculo de novos ajustes é acionado e em seguida envia os dados para os relés que devem ser reajustados. Além disso, existem agentes responsáveis pelo gerenciamento das mensagens do sistema, capacidade da rede de comunicação e também pela coordenação dos agentes móveis. Simulações desse SMA realizadas utilizando um sistema real da China com 98 nós e 286 relés mostraram que o desempenho da grande maioria dos relés de sobrecorrente das linhas apresentou expressiva melhoria, além de garantir um bom tempo de execução das tarefas.

Quanto a diagnósticos de equipamentos, em [47] é apresentado um sistema multiagente para um diagnóstico integrado de transformadores de potência que considera tanto informações de equipamentos de monitoração *on-line* quanto de métodos de diagnóstico *off-line* (baseados em métodos tradicionais ou por inteligência artificial). O sistema multiagente implementado, chamado DITRANS, possui uma arquitetura planar com todos os agentes tendo a mesma prioridade e é possível a comunicação entre todos eles no sistema, sendo que agente fica encarregado de receber todos os diagnósticos e produzir um único resultado. Cada agente de diagnóstico é responsável pela análise dos resultados de testes específicos, como os testes realizados *off-line* com o equipamento desconectado: resistência elétrica, resistência de isolamento, fator de potência, análise de resposta em frequência, corrente de polarização e despolarização, descargas parciais, grau de polimerização, medição

de tensão de retorno e tangente delta (f); e os testes *off-line* com o equipamento energizado: análise dos gases dissolvidos, análise físico e química, envelhecimento do isolamento e 2-fal. Além disso, um agente é responsável por receber os alarmes dos dispositivos de monitoramento *on-line*, como temperatura, umidade e gases no transformador. O DI-TRANS possui uma interface onde o usuário pode visualizar os resultados do sistema, alarmes e notificações dos agentes. O sistema pode ser inicializado através de um usuário, um aviso de perigo da monitoração *on-line*, que logo em seguida inicia os agentes de diagnósticos energizados, ou quando o sistema *fuzzy* detecta alteração significativa nos dados da análise dos gases dissolvidos. Com este sistema é possível integrar diversas análises feitas em diferentes laboratórios, além de ser capaz de analisar resultados conflitantes, e assim obter uma melhoria na confiabilidade e eficiência da manutenção dos transformadores de potência.

Entretanto, aplicações em sistemas reais dos sistemas multiagentes na área de sistema de potência são difíceis de serem encontradas, mas o projeto PEDA (*Protection Engineering Diagnostic Agents*) é um exemplo. No ano de 2003 foi publicado o artigo [48], em que é proposta uma arquitetura Multiagente para assistência em análises pós-faltas. Este sistema, com o nome de PEDA (*Protection Engineering Diagnostic Agents*), trouxe como inovação a integração de interpretações de informações oriundas do sistema SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) e de Registradores Digitais de Perturbações (RDPs), além de melhorar a seleção de faltas registradas em RDPs remotos. A principal vantagem apontada pelos autores para o uso da arquitetura Multiagente é a flexibilidade para integrar módulos com diferentes tecnologias. Isso porque tal integração entre os módulos só é possível se a comunicação é eficiente, o que neste caso trataria de ser uma padronização não existente. Entretanto, em um SMA isso se torna possível devido à linguagem em comum dos agentes através da ontologia, mesmo que cada agente entenda a linguagem própria de cada módulo. Além disso, é possível adicionar novos módulos sem a necessidade de ajustes no sistema para uma nova linguagem. O SMA criado possui três principais agentes, sendo eles: Identificação de Incidente e Evento (IEI - *Incident and Event Identification*), Recuperação de Gravação de Falta (FRR - *Fault Record Retrieval*) e Interpretação da Gravação de Falta (FRI - *Fault Record Interpretation*). O agente IEI se utiliza de um sistema de identificação de incidentes e eventos já existente para o SCADA, que é o chamado *Telemetry Processor*, então o agente serve como envelope para este sistema para que a funcionalidade seja incorporada ao PEDA.

O agente FRR seleciona RDPs disponíveis para novas gravações e prioriza as recuperações baseadas nas informações repassadas pelo IEI. Já o agente FRI recebe as gravações de falta do agente FRR e interpreta-as para gerar informações úteis para os engenheiros de proteção. Utilizando sistemas especialistas aliados à comunicação, esse sistema filtra as informações importantes do sistema SCADA e também dos RDPs envolvidos, além de proporcionar uma interpretação de tais informações, assim como define se há informações pertinentes em RDPs remotos. No mesmo ano, em [49], uma nova versão da arquitetura foi sugerida com a adição do agente Validação da Proteção e Diagnóstico (PVD - *Protection Validation and Diagnosis*), que deve validar a operação da proteção durante o incidente e diagnosticar alguma falha nos componentes do esquema de proteção utilizando regras que controlam a execução de tarefas. Partindo disso, em novembro de 2004 o sistema PEDA foi instalado na empresa de transmissão SP PowerSystems, no Reino Unido, para o gerenciamento e interpretação dos dados *on-line* relativos ao diagnóstico da proteção e os resultados observados por 6 meses são discutidos em [50]. Algumas modificações foram necessárias para que o sistema pudesse ser colocado na operação real, como uma atualização dos *Standards* dos SMA, mudança do ambiente de desenvolvimento do SMA para suportar uma operação *on-line* contínua (JADE) e, por exigência dos engenheiros de proteção da empresa, um agente que possibilite o acesso aos resultados obtidos pelo PEDA e o histórico de dados nos quais os resultados foram baseados. Para isso o agente *Collation* foi criado e, também, um agente chamado *Engineering Assistant* (EA) que pudesse ser instalado no computador do engenheiro de proteção para que uma notificação seja enviada no momento em que as informações de um novo incidente estejam disponíveis. Um ponto interessante durante o período em análise é que os RDPs instalados estavam em transição da versão de seu *software*, sendo que inicialmente eram 3 diferentes tipos de RDPs, cada um com um agente FRR. Com a nova versão foram necessários outros 3 FRRs para serem compatíveis, totalizando 6 agentes FRRs no período de transição. Quando todo o parque foi atualizado, os 3 agentes FRRs compatíveis com a versão antiga foram simplesmente eliminados do sistema. Isso demonstrou a flexibilidade e extensibilidade do SMA, onde agentes podem ser facilmente removidos como *hardwares* ou *softwares* obsoletos, assim como sem dificuldades novos *hardwares* e *softwares* podem ser adicionados ao sistema. Sobre a operação do sistema, nos 6 meses de análise foram 2 milhões de alarmes gerados, sendo que o agente IEI identificou corretamente os 402 incidentes ocorridos. Com a colaboração do IEI,

os agentes FRR foram capazes de realizar a primeira triagem de 583 gravações, baseada nos resultados das análises dos dados do SCADA. Esses resultados demonstram que o PEDA fornece o suporte para o diagnóstico de faltas selecionando os dados que são mais importantes para os engenheiros de proteção com a operação contínua no sistema real. Em 2009 algumas novas especificações foram colocadas para o uso do PEDA na empresa de transmissão, e aliado à isso os pesquisadores também pensaram em novas funcionalidades que pudesse ser incluídas no PEDA. Então, em [51] são apresentados os próximos passos para uma nova versão do PEDA, como relatórios automatizados, sendo que uma das tarefas que mais consome o tempo dos engenheiros de proteção é montar o relatório, análise de transformadores de potencial e análise de bobina de disparo. Além disso, melhoras nos já existentes agentes devem diminuir ainda mais os tempos de análise dos engenheiros de proteção para identificar o incidente, confrontar todos os dados do incidente e analisá-los.

4.8 CONCLUSÕES

Os sistemas de potência possuem seus elementos naturalmente distribuídos, sendo eles seus componentes físicos como geradores, linhas de transmissão e distribuição, transformadores, banco de capacitores, relés, etc, assim como o conjunto desses elementos como a distribuição das usinas geradoras e subestações. Essa visão também pode ser diferenciada por ser mais ampla ou mais pontual, e mesmo assim continuar distribuída. Por exemplo, a análise dos elementos de uma subestação ou de um sistema tratando a subestação como um elemento. Além disso, as informações também ficam dispostas de forma distribuída como o fluxo de potência em determinadas barras ou informações de *status* dos disjuntores em determinados nós.

Quanto aos problemas e situações existentes nos sistemas de potência também é observada esta distribuição nos diagnósticos de perturbações que exigem a coleta de informações oriundas dos equipamentos localizados no campo ou mesmo nas operações de recomposição atuando remotamente nos equipamentos baseando-se em dados de diversos pontos do sistema. Na proteção, a coordenação de relés exige que se tenha informação dos relés vizinhos ou mesmo para a seletividade é necessário informações de diferentes pontos para a correta operação do relé, como é o caso do relé diferencial.

Além disso, conforme já mencionado, existe a frequente mudança

no sistema com a inserção de novas unidades de geração distribuída, exigindo flexibilidade no tratamento dos problemas. Com isso e aliado as características distribuídas dos sistemas de potência, a utilização de sistemas multiagentes se mostra uma abordagem apropriada e poderosa. Mais especificamente na coordenação da proteção, com a utilização de um SMA é possível alcançar uma coordenação *on-line* através da comunicação dos agentes, evitando assim estudos complexos para alcançar seletividade e coordenação em situações adversas com forte inserção de unidades de GD.

5 ARQUITETURA MULTIAGENTE PROPOSTA

Neste capítulo será apresentado o sistema multiagente proposto para a coordenação de relés de sobrecorrente em sistemas radiais com a inserção de unidades de geração distribuída. Serão descritos os componentes desenvolvidos e as funcionalidades que o sistema possui para garantir a seletividade e coordenação do sistema de proteção de forma eficaz e vantajosa perante o sistema de proteção tradicional.

5.1 PLATAFORMA JADE

5.1.1 Componentes da Arquitetura JADE

Uma das facilidades para a implementação dos sistemas multiagentes é a possibilidade de explorar os recursos oferecidos pelas plataformas de desenvolvimento. A plataforma é o ambiente em que os agentes vivem e interagem, utilizando dos recursos disponíveis nela para cumprirem suas tarefas e se comunicarem. Nesta seção será feita uma breve exploração dos principais recursos da plataforma utilizada neste trabalho para que se entenda melhor a criação e funcionamento do SMA proposto.

O sistema proposto foi desenvolvido na plataforma JADE (Java *Agent DEvelopment Framework*) que é compatível com as especificações da FIPA (*Foundation for Intelligent Physical Agents*) e adota a linguagem FIPA - ACL para a comunicação entre os agentes do SMA. Os elementos principais da arquitetura JADE estão representados na Figura 5.1.

Uma plataforma é composta por um ou mais *Containers* que podem ser executados de diferentes *hosts*, criando uma plataforma distribuída. Além disso, cada *Container* pode possuir zero ou mais agentes (cada um com um nome distinto). No caso da Figura 5.1 “Container 1”, no *Host* 3, possui os agentes Ag2 e Ag3.

Além disso, existe um *container* com características distintas, que é o chamado *Main Container*, que pode funcionar como qualquer outro *container*, mas possui diferenças como ser o primeiro *container* a inicializar na plataforma e também possui 2 agentes especiais que são automaticamente criados, são eles [9]:

- Agente AMS (*Agent Management Service*): é a autoridade da

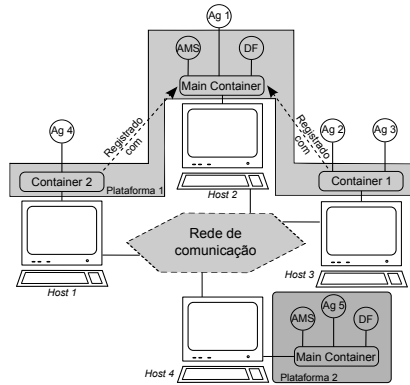


Figura 5.1 – Plataforma JADE [10]

plataforma, ou seja, ele que a supervisiona e também o único com poderes de gerenciamento dela, como o de criar ou destruir agentes ou mesmo fechar a plataforma. Quando um outro agente deseja executar alguma ação de gerenciamento da plataforma, este deve pedir ao agente AMS que a execute.

- Agente DF (*Directory Facilitator*): este agente fornece o serviço de “Páginas Amarelas” onde os agentes se registram anunciando seu nome e o serviço oferecido. Assim, quando algum agente da plataforma deseja algum serviço basta pesquisar na lista (através do agente DF) para achar um ou mais agentes que fornecem o que ele deseja, este serviço está ilustrado na Figura 5.2. Além disso, também é possível que se faça um pedido para que, caso haja alguma modificação na lista (novos serviços ou mudança) que se encaixe a um determinado perfil, o agente que fez o pedido receba alguma notificação.

Caso um novo *Main Container* seja criado, isso significa que uma nova plataforma agora existe (caso da plataforma 2 da Figura 5.1).

5.1.2 Execução de tarefas

As tarefas que um agente possui são todas realizadas através do que são chamados comportamentos (*behaviours*) para compor o seu “ciclo de vida”. Esses comportamentos podem ser utilizados separa-

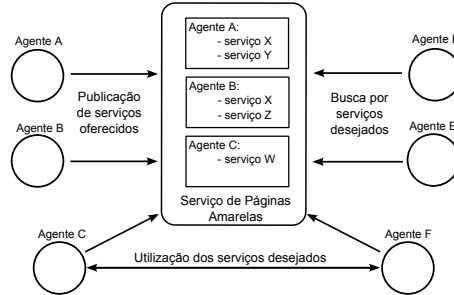


Figura 5.2 – Serviço de Páginas Amarelas [9]

damente ou em conjunto, sendo que a melhor forma de organizá-los depende das tarefas a serem executadas e da comunicação entre os agentes do sistema. Existem três tipos base de comportamentos no JADE, que são [9]:

- *One-shot*: este comportamento é executado apenas uma vez, ou seja, as ações contidas neste comportamento serão realizadas uma única vez;
- *Cyclic*: é um comportamento criado para nunca se completar, executando as tarefas de forma cíclica, e também realiza as mesmas operações cada vez que é chamado;
- *Generic*: possui uma variável de gatilho e dependendo do valor desta variável diferentes operações são executadas;
- e também existe a possibilidade de comportamentos complexos com a composição de vários comportamentos.

5.2 AGENTES DO SMA PROPOSTO

O Sistema Multiagente proposto possui uma estrutura hierárquica com três tipos de agentes: um único agente Coordenação, um único agente Configurador e tantos agentes Relé quanto relés físicos existirem no sistema. Esta configuração está ilustrada na Figura 5.3.

No sistema real os agentes Relés estariam distribuídos na rede, instalados nos relés físicos existentes. Já os agentes Coordenação e Configurador estariam instalados em um centro de operação. Entretanto,

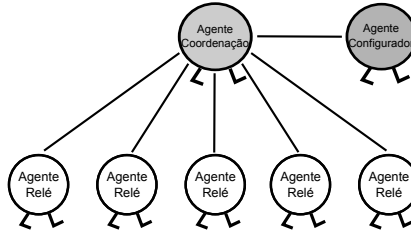


Figura 5.3 – Arquitetura do SMA proposto

neste trabalho toda a plataforma está sendo simulada em apenas um computador.

Os três tipos de agentes existentes neste sistema possuem um comportamento cíclico com alguns outros comportamentos concatenados dentro dele. São usados eventos, como a criação de um novo agente, ou mensagens de outros agentes como gatilho para a execução de suas ações.

5.2.1 Agente Relé

É um agente reativo que detecta a falta e envia uma mensagem com o valor e sentido da corrente de falta medida para o agente Coordenação. Em seguida, espera a ordem de operar ou não, ou seja, se deve enviar o sinal de abertura para o disjuntor. A lógica deste agente é mostrada no fluxograma da Figura 5.4

Como não é o foco do presente trabalho a detecção de falta no relé, a rotina implementada foi apenas uma comparação dos valores de correntes sentidas pelo relé durante a simulação com o valor de corrente anteriormente medido pelo relé. Caso a diferença ultrapasse o limite configurado, o relé considera a nova corrente medida uma corrente de falta e a envia para o agente Coordenação.

Um ponto importante a ser observado é que cada agente Relé possui valores de ajustes tradicionais para o caso de uma falha na comunicação. Para isso, ele possui um comportamento do tipo *Waker-Behaviour*, que só é acionado a partir de um tempo ajustado, o qual determina a atuação *default* do relé. Assim, no momento em que o agente Relé sente a falta são calculados os tempos de operação ajustados de forma tradicional, e este serve de parâmetro para acionar o comportamento do tipo *WakerBehaviour*, que inicia a contagem de

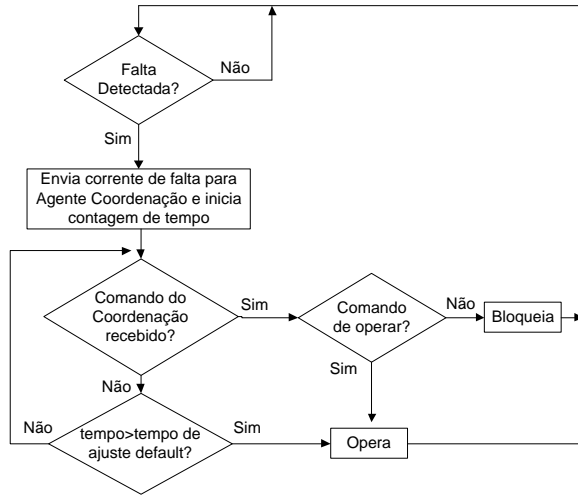


Figura 5.4 – Lógica do agente Relé

tempo. Caso nenhuma ordem seja recebida do agente Coordenação até que o tempo decorrido ultrapasse o tempo de operação ajustado, o relé executa o comportamento, ou seja, ele atua.

5.2.2 Agente Coordenação

Este agente é responsável por identificar a localização da falta (seção da rede) utilizando os valores de corrente recebidos dos agentes Relé após uma falta combinados a informações topológicas da rede. Além disso, é ele quem coordena a operação ou não dos relés através de mensagens. O agente Coordenação espera um tempo após o recebimento da primeira mensagem de falta, ajustado em 20 ms, para iniciar os processos visando assim garantir que todos os relés tenham enviado a mensagem, caso não exista problemas de comunicação. Na Figura 5.5 é apresentado o fluxograma geral do agente Coordenação.

A localização da falta é feita através da comparação dos valores de corrente de falta, considerando o trecho sob falta aquele em que o relé enviou o maior valor de corrente, pois o sistema principal contribui

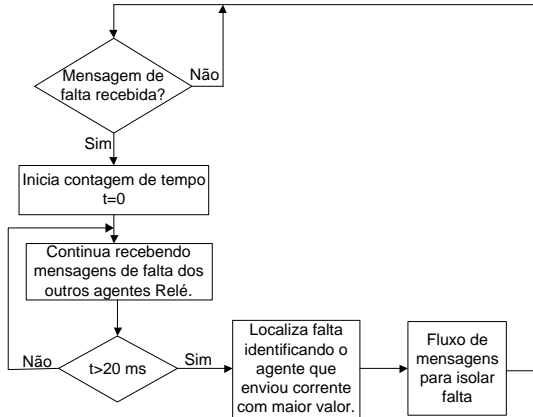


Figura 5.5 – Fluxograma geral do agente Coordenação

com valores muito maiores para a corrente de falta, e ao longo da linha as GDs também aumentam essa corrente, conforme Figura 5.6.

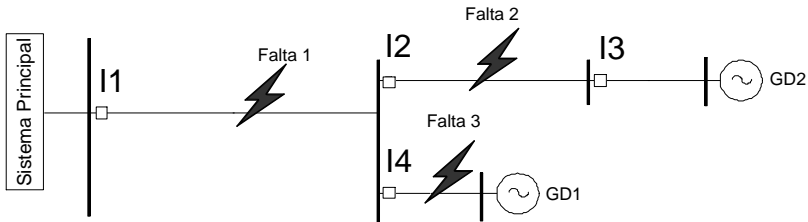


Figura 5.6 – Exemplificação para localização da falta

Para a Falta 1 a corrente I1 é muito maior que as correntes sentidas pelos outros relés, pois há a contribuição do sistema principal apenas neste relé, enquanto que nos outros relés há apenas a contribuição das GDs. Já na Falta 2 tanto I1 quanto I2 possuem a contribuição do sistema principal, mas I2 é maior devido à contribuição de GD1. No caso da Falta 3, I4 é a corrente maior, pois possui a contribuição do sistema principal e GD2, enquanto I1 apenas possui a contribuição

do sistema principal e I2 e I3 apenas de GD2. Além disso, caso não houvesse GD1 no caso da Falta 2, as correntes I1 e I2 seriam iguais, e nesses casos o Coordenação considera a falta à jusante do relé mais ao extremo da linha entre os dois, identificando corretamente a localização da falta.

5.2.3 Agente Configurador

Este agente é um sistema especialista que define quais são os relés que devem operar tanto na zona de proteção primária quanto para o *backup* de cada elemento do sistema, sempre considerando a topologia atual do sistema. Esse agente foi desenvolvido utilizando a ferramenta JESS (*Java Expert System Shell*) que permite a integração do sistema especialista ao SMA desenvolvido no JADE.

Na inicialização do Configurador são lidos os arquivos de configuração do sistema com os dados para construção da configuração atual da rede, que é atualizada a cada modificação, sendo ela de novos elementos ou mudança de estado de algum disjuntor. As regras de configuração do sistema estão ligadas às regras de operação do sistema de proteção, pois a atuação da proteção depende da topologia.

As regras para a proteção possuem como gatilho a mensagem do agente Coordenação, que deve conter a localização da falta (é informado o relé que protege a seção da rede sob falta) e o tipo de proteção (primária ou retaguarda). Isso porque as regras foram desenvolvidas considerando o tipo de elemento que o relé está protegendo (PCH ou linha), sendo esta uma informação contida no arquivo de configuração. A Figura 5.7 mostra a configuração básica da rede considerada para o desenvolvimento das regras de proteção.

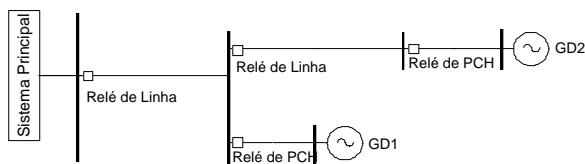


Figura 5.7 – Configuração base para as regras de proteção implementadas.

Um exemplo de regra simples de operação do Configurador é a da proteção de uma falta à montante de um relé de PCH, tendo em vista que para isolar a falta do sistema, basta que se abra o disjuntor entre a barra e o transformador da PCH.

*Se Relé x é Relé de PCH E proteção é primária
Então abre Relé x .*

Já para o caso de faltas nas linhas, a regra considera que para isolar a falta é necessário que se abra os disjuntores dos relés imediatamente à montante e jusante na linha e também, caso haja, o disjuntor da GD entre os dois de linha. De forma simplificada esta regra é da seguinte forma:

*Se Relé x é Relé de linha E proteção é primária
E Relé x pertence Circuito ($a b c x y z w$)
Então abre Relé x , Relé y e Relé z*

Sendo que *Circuito* ($a b c x y z w$) indica quais os relés presentes no circuito, neste exemplo seriam os relés a , b , c , x , y , z e w .

Essas duas regras servem apenas para exemplificar o funcionamento do Configurador, sendo que além destas regras existem outras que podem ou não ser disparadas dependendo da configuração da rede atual.

O agente Configurador possui o arquivo desenvolvido no JESS com as regras do sistema especialista que irá executar. Foram desenvolvidos dois arquivos com algumas regras distintas, um para o caso do SMA ser responsável por garantir o anti-ilhamento e outro para reproduzir o panorama atual dos ajustes no caso do sistema real que será utilizado como comparativo nos testes. Neste último caso a empresa distribuidora possui seus ajustes com o objetivo de garantir a desconexão da falta do sistema principal, sendo de responsabilidade do acessante a proteção do subsistema isolado. Para que se faça a mudança de tipo de operação, basta que o operador escolha o agente que a possui e assim haverá a troca automática do arquivo, sem a necessidade de outra intervenção do usuário.

5.2.4 Arquivos de dados

Para o funcionamento do sistema são necessários 4 arquivos de texto que possuem informação de configuração do sistema. São eles:

- arqdados.txt:

É um arquivo de dados de rede que contém a informação dos circuitos, ramos e suas barras de saída e de chegada, os disjuntores (associados aos agentes relés) e seus *status* iniciais (aberto ou fechado).

- RelesAjustesF.txt:

Este arquivo é a informação fixa contida em cada agente relé, por isso é carregado apenas uma vez por cada agente em sua criação. Assim, o relé passa a ter os dados de ajuste *default* (ajuste dos elementos instantâneo e temporizado) e seu tipo (se é relé que protege a linha ou a PCH). São os ajustes dos elementos na direção para frente.

- RelesAjustesR.txt:

É o mesmo tipo de arquivo do item anterior, mas com os ajustes para a direção reversa.

- Correntes.txt:

São os valores iniciais de correntes em cada relé.

5.3 FLUXO DE MENSAGEM

O fluxo de mensagens no primeiro estágio de atuação do SMA, operação primária da proteção, pode ser visto na Figura 5.8.

- Passo 1: Os agentes Relés detectam a falta e enviam para o agente Coordenação a corrente de falta medida por eles e sua direção.
- Passo 2: Coordenação identifica a localização da falta e a envia para o agente Configurador.
- Passo 3: Configurador define quais os relés que devem operar para aquela falta e envia uma lista com seus números para o agente Coordenação.

- Passo 4: Coordenação envia para os agentes Relé da lista uma ordem de operar e para o restante de bloquear.
- Passo 5: Após realizar a ordem, os agentes Relé confirmam suas ações para o Coordenação.

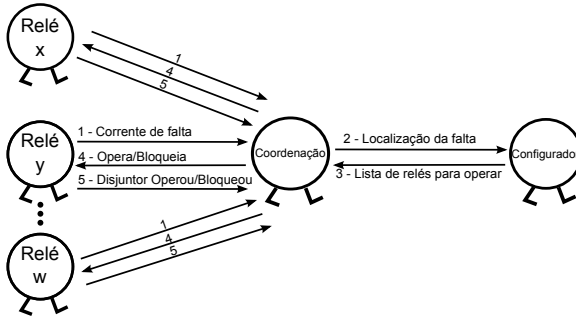


Figura 5.8 – Fluxo de mensagem na operação primária

A comunicação entre os agentes Relé e o agente Coordenação é feita através de protocolos de comunicação, que permitem uma melhor coordenação com o recebimento e envio de mensagens e também simplificam a tarefa de programação. Com o uso destes protocolos é fácil de identificar alguma falha de comunicação, pois sabe-se quais mensagens foram enviadas, para quem, quantas e também de quem deverão ser recebidas de volta.

Existem 3 tipos de falha possíveis, a primeira seria o caso da falha de comunicação do SMA, e assim o Relé não seria capaz de enviar a mensagem com a corrente de falta para o Coordenação. Nesta situação, conforme dito anteriormente, o relé atua conforme seus ajustes padrão. A falha de um disjuntor também é considerada, e nesta situação o agente Relé percebe o problema e responde ao Coordenação com uma mensagem de falha de disjuntor. Outro caso é a falha de um relé propriamente dito, ou seja, ele não envia nenhuma mensagem de confirmação para o Coordenação. Nas duas últimas situações o estágio de retaguarda é iniciado, e para ambas as falhas o procedimento é idêntico, bastando apenas que seja identificada alguma falha. Para isso, o Coordenação percebe o problema ou recebendo a mensagem de falha de disjuntor do agente Relé, ou quando não recebe confirmação alguma.

O primeiro passo nesse estágio é o passo 5 da operação primária. A Figura 5.9 ilustra o caso em que na primeira zona o Relé x não deve atuar, mas o Relé y falha em confirmar suas ações, e o Relé x é a retaguarda neste caso.

- Passo 1: Os relés confirmam suas ações ao Coordenação. Relé y falha e nenhuma confirmação é enviada por ele.
- Passo 2: Coordenação identifica o problema e envia para o agente Configurador o pedido de retaguarda para o Relé y.
- Passo 3: Configurador define quais os relés de retaguarda para o determinado caso e envia uma nova lista para o agente Coordenação.
- Passo 4: O agente Coordenação então envia para os agentes Relé da nova lista a ordem de operar, ou seja, Relé x recebe a mensagem “Opera”.
- Passo 5: Após realizar a ordem, os agentes Relé confirmam suas ações para o Coordenação.

Caso ocorra alguma outra falha este estágio é novamente inicializado e o ciclo continua até que a falta seja extinta.

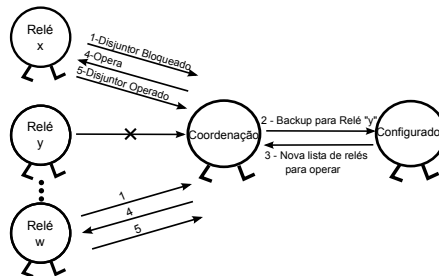


Figura 5.9 – Fluxo de mensagem na operação de retaguarda

Outro ponto importante do sistema desenvolvido é a facilidade de considerar mudanças topológicas. Além de estar sempre atualizado com informações de status de *disjuntores* e assim proporcionar a proteção mais adequada para o sistema, o programa também comporta facilmente mudanças topológicas de inserção de novas linhas, unidades de geração e agentes.

Esta é uma grande vantagem oferecida, pois utilizando a proteção tradicional a cada nova topologia seria necessário todo o estudo de seletividade e coordenação da proteção para garantir que não haja descoordenação, e caso ocorra, o sistema de proteção deve ser reajustado. Esta é uma tarefa que demanda muito tempo e muitas vezes pode se tornar bastante complexa, o que é evitado com o uso do SMA proposto. Neste caso é necessário apenas que se atualize o arquivo de dados do sistema do novo agente, adicionando a linha correspondente a ele e com suas barras de origem e destino, e em seguida o inserir na sistema. Para isso, o sistema utiliza o serviço de páginas amarelas, comentado anteriormente, onde o novo agente Relé necessita apenas se registrar no sistema com seus dados e automaticamente uma mensagem é enviada para os agentes Coordenação e Configurador e então suas base de dados são atualizadas e ajustadas.

6 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

6.1 SISTEMA-TESTE

Para a validação do SMA proposto foi utilizado um sistema-teste baseado em uma rede de distribuição real, apresentado na Figura 6.1. Foram simuladas faltas utilizando o *software* ANAFAS (Análise de Faltas Simultâneas), disponibilizado para a UFSC pelo CEPTEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica). Os valores das correntes nos curtos-circuitos obtidos com essas simulações foram aplicados ao sistema multiagente e também aos ajustes reais, fornecidos pela empresa de distribuição, dos relés e com isso os tempos de operação puderam ser comparados, conforme esquema mostrado na Figura 6.2.

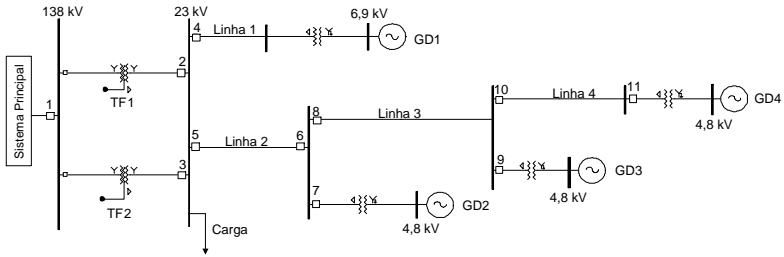


Figura 6.1 – Sistema-teste

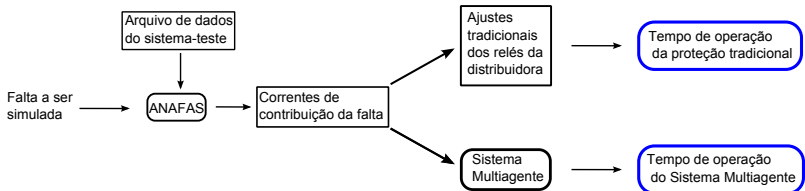


Figura 6.2 – Esquemático para a obtenção dos tempos de operação dos sistemas de proteção tradicional e proposto.

Neste sistema-teste o alimentador principal pertence à distribuidora de energia elétrica e as unidades de GD são pequenas centrais hidroelétricas pertencentes à uma empresa privada. Com o finalidade de proteger o sistema principal de possíveis correntes de sequência zero

oriundas das unidades de GD, a distribuidora de energia elétrica determina que os transformadores elevadores tenham conexão delta-estrela, conforme verificado na Figura 6.1. Outro ponto importante é que os ajustes destes relés têm o objetivo de proteger e isolar o sistema da distribuidora no caso de uma falta no subsistema, sendo a proteção do subsistema e geradores de responsabilidade da empresa que possui a GD. Os quadrados nesta figura representam os disjuntores e respectivos relés, com exceção do número 5 que é um religador. Os relés possuem dois ajustes distintos pela função direcional, um para faltas à frente e outro atrás. Por exemplo, o relé associado ao disjuntor 8 protege a linha 2 no seu ajuste para frente e a linha 3 no seu ajuste para trás.

As capacidades das plantas de geração distribuída GD1, GD2, GD3 e GD4 são respectivamente 6,75 MW, 3,0 MW, 3,0 MW e 3,6 MW. Os transformadores TF1 e TF2 possuem capacidade de 28,53 MVA e 26,67 MVA. A carga do sistema é 33 MVA.

Devido à conexão dos transformadores elevadores das unidades GD1, GD2, GD3 e GD4 não há contribuição destas GDs para uma falta à terra quando estas estão isoladas do sistema principal, então situações de ilhamento podem ocorrer se houver apenas proteção através da função de sobrecorrente. Como atualmente o estado de ilhamento é indesejado na maioria das distribuidoras de energia elétrica brasileiras, é necessária a aplicação de funções adicionais de proteção para desligar essas unidades, como os relés de frequência e tensão [52]. Para o caso do sistema multiagente a função de evitar o ilhamento é naturalmente obtida caso desejada.

6.2 CONFIGURAÇÕES E CONSIDERAÇÕES

Para se estabelecer os tempos de operação dos relés do SMA apresentados, as simulações foram realizadas em um computador com processador Intel Core2 Duo 2 GHz e memória RAM de 3,00 GB. As seguintes considerações foram feitas:

- Os tempos de operação dos relés no SMA implementado considera um tempo de comunicação de 10 ms (cada trecho) para cada mensagem [53].
- Para o cálculo do tempo de atuação para a proteção de retaguarda, é considerado um tempo de confirmação da falha do disjuntor de 7 ciclos (117ms) [54].
- Ajuste de 20 ms no tempo de espera do agente Coordenação para

rentes medidas por cada relé e sua direcionalidade. Este arquivo será lido pelo agente criado quando é desejado simular a falta no SMA já em funcionamento. O sistema é iniciado e então a plataforma entra em funcionamento com os agentes criados. Após o recebimento do valor da corrente por cada agente Relé, este valor é comparado com o valor medido no instante anterior, e caso a diferença ultrapasse o limite ajustado (aqui considerado um ajuste de 30 A), o Relé envia uma mensagem com o valor medido para o agente Coordenação. O agente Coordenação inicia uma contagem de 20 ms após a primeira mensagem de falta recebida para iniciar o processo de identificação do local da falta. Após determinada a localização da falta, o agente Coordenação envia uma mensagem para o agente Configurador com o local determinado, que o responde com os relés que devem operar para isolar a falta. Através da funcionalidade *Sniffer*, disponível na plataforma JADE, é possível que sejam vistas todas as mensagens trocadas entre os agentes, e na Figura 6.4 são mostradas algumas das mensagens trocadas nesta fase inicial da proteção primária.

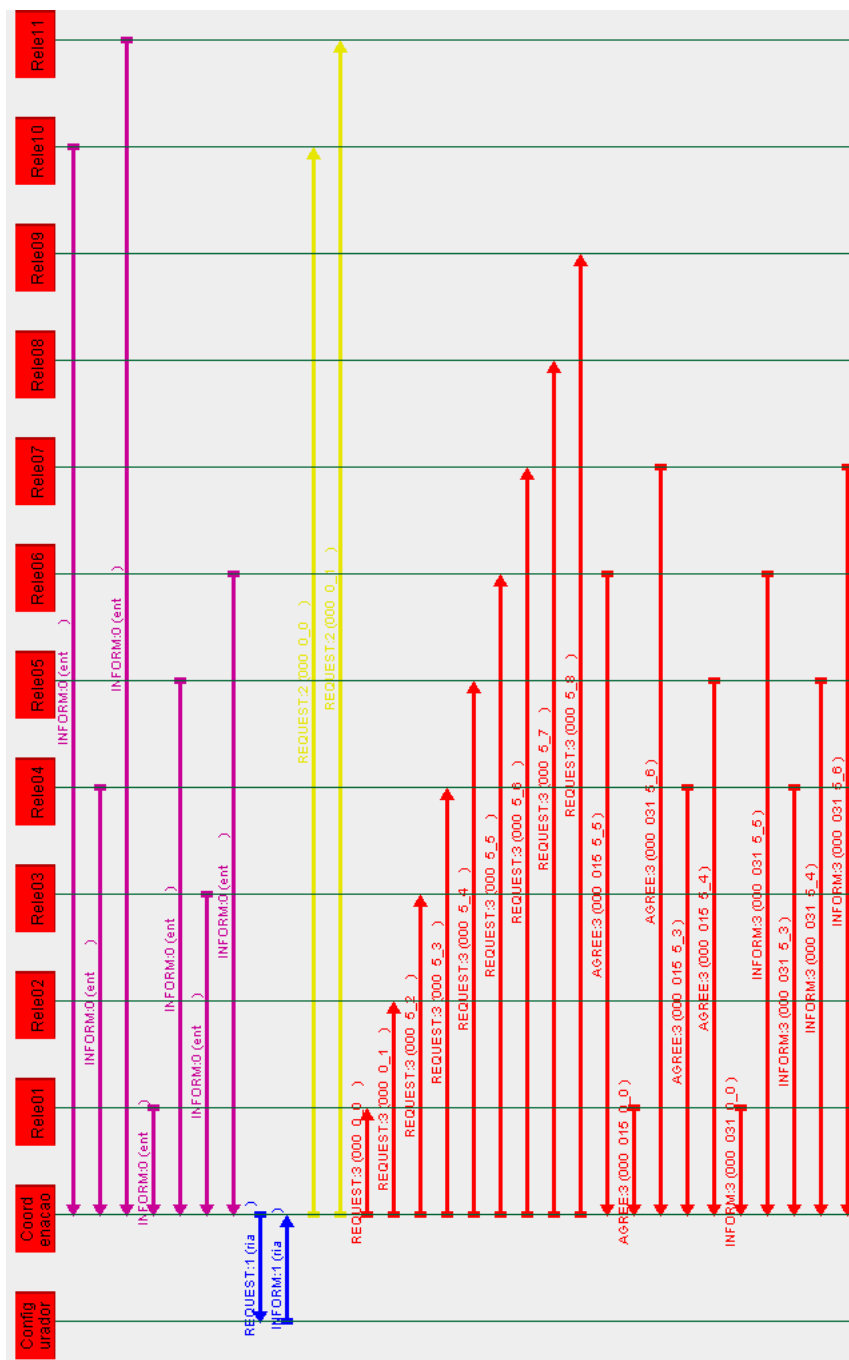


Figura 6.4 – Mensagens trocadas entre os agentes na proteção primária

As mensagens na cor rosa são os *inform*s enviados dos agentes Relés indicando o valor da corrente de falta sentida por ele. Seguindo o processo tem-se em azul as mensagens trocadas do Coordenação, que envia um *request* para o agente Configurator e este o responde com um *inform*. Ao selecionar uma mensagem neste ambiente, é possível ver detalhes desta, como é mostrado na Figura 6.5 (a), onde a primeira mensagem é a do Coordenação (*sender*), endereçada ao Configurator (*Receivers*), tendo como conteúdo (*content*) o valor 10, ou seja, a localização identificada da falta é na zona de proteção primária do relé 10 a sua frente (sentido sistema principal ao GD4). Outro parâmetro da mensagem é sua identificação (*conversation-id*), que neste caso é Primária, avisando ao Configurator que se trata da proteção primária de uma falta na zona do Relé 10. A segunda mensagem, Figura 6.5 (b), é a resposta do Configurator (*sender*) ao Coordenação (*Receivers*), com a lista dos relés que devem operar, 10 e 11 (o número zero aparece em todas as listas enviadas pelo Configurator como dígito indicador de final).

ACL Message

ACLMessage Envelope

Sender: View Coordenacao@192.168.0.100

Receivers: Configurator@192.168.0.100:10

Reply-to:

Communicative act: request

Content: 10

Language:

Encoding:

Ontology:

Protocol: Null

Conversation-id: Primaria

In-reply-to:

Reply-with:

Reply-by: View

User Properties:

OK

(a)

ACL Message

ACLMessage Envelope

Sender: View Configurator@192.168.0.100

Receivers: Coordenacao@192.168.0.100:10

Reply-to:

Communicative act: inform

Content: 10 11 0

Language:

Encoding:

Ontology:

Protocol: Null

Conversation-id: Primaria

In-reply-to:

Reply-with:

Reply-by: View

User Properties:

OK

(b)

Figura 6.5 – (a) Mensagem do agente Coordenação para o Configurator
(b) Mensagem de resposta do Configurator ao Coordenação

Continuando o fluxo na Figura 6.4, após o recebimento da lista de relés que devem operar, o Coordenação inicia um protocolo de comunicação com cada agente Relé, sendo que para os que devem operar é enviado um *request* de Abrir Disjuntor (Figura 6.6), mostrados na cor amarela; enquanto que para os agentes que não devem operar, um *request* de Bloqueia Disjuntor é enviado. Esta mensagem de bloqueio impede que o relé opere através da contagem por proteção *default*, ou seja, ele sentiu a falta e iniciou a contagem tradicional, e agora recebe a ordem de não atuar. Essas são as mensagens em vermelho. É então esperada de cada Relé uma resposta ao pedido do Coordenação (se concorda ou recusa) e em seguida um *inform* indicando a finalização da tarefa para aqueles que concordaram com a tarefa.

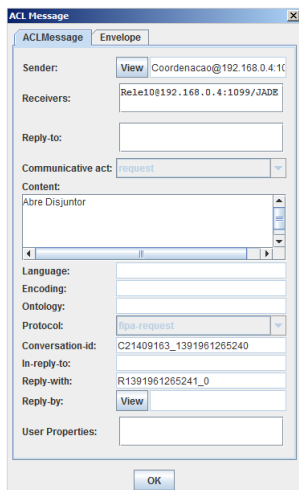


Figura 6.6 – Mensagem do agente Coordenação para um agente Relé para abrir o disjuntor

No SMA implementado, para simular a falha de um disjuntor, a mensagem de resposta ao Coordenação é uma recusa à tarefa (*refuse*), conforme pode ser verificado na Figura 6.8, que mostra a sequência das mensagens após o pedido de abertura ou bloqueio dos disjuntores, e em amarelo a mensagem do Relé 10 ao Coordenação como *Refuse*.

Com isso, o Coordenação identifica se o agente Relé indicando falha (tanto pode ser na comunicação, quanto falha no disjuntor) é onde se localiza a falta ou não. Em seguida é enviada uma nova mensagem ao agente Configurador com o Relé que necessita retaguarda, junto

com a informação sobre a localização da falta. Na Figura 6.7 (a) é mostrada esta mensagem, onde no seu conteúdo tem-se o Relé sob falha e “1” quando este é o local da falta e “0” quando não. A Figura 6.7 (b) mostra a resposta do Configurador, indicando novamente os relés (disjuntores) que devem operar. O Coordenação então envia o pedido de abertura dos disjuntores para o Relés, excluindo aquele que apresentou falha anteriormente. Na Figura 6.8, em rosa, é possível verificar que os pedidos foram enviados aos Relés 8 e 9.

ACL Message dialog box (a) details:

- Sender:** View Coordenação@192.168.0.100
- Receivers:** Configurador@192.168.0.100:105
- Reply-to:** (empty)
- Communicative act:** request
- Content:** 10 1
- Language:** (empty)
- Encoding:** (empty)
- Ontology:** (empty)
- Protocol:** null
- Conversation-id:** Retaguarda
- In-reply-to:** (empty)
- Reply-with:** (empty)
- Reply-by:** View
- User Properties:** (empty)

(a)

ACL Message dialog box (b) details:

- Sender:** View Configurador@192.168.0.100
- Receivers:** Coordenação@192.168.0.100:105
- Reply-to:** (empty)
- Communicative act:** inform
- Content:** 0 9 10 0
- Language:** (empty)
- Encoding:** (empty)
- Ontology:** (empty)
- Protocol:** null
- Conversation-id:** Retaguarda
- In-reply-to:** (empty)
- Reply-with:** (empty)
- Reply-by:** View
- User Properties:** (empty)

(b)

Figura 6.7 – (a) Mensagem do agente Coordenação para o Configurador
(b) Mensagem de resposta do Configurador ao Coordenação

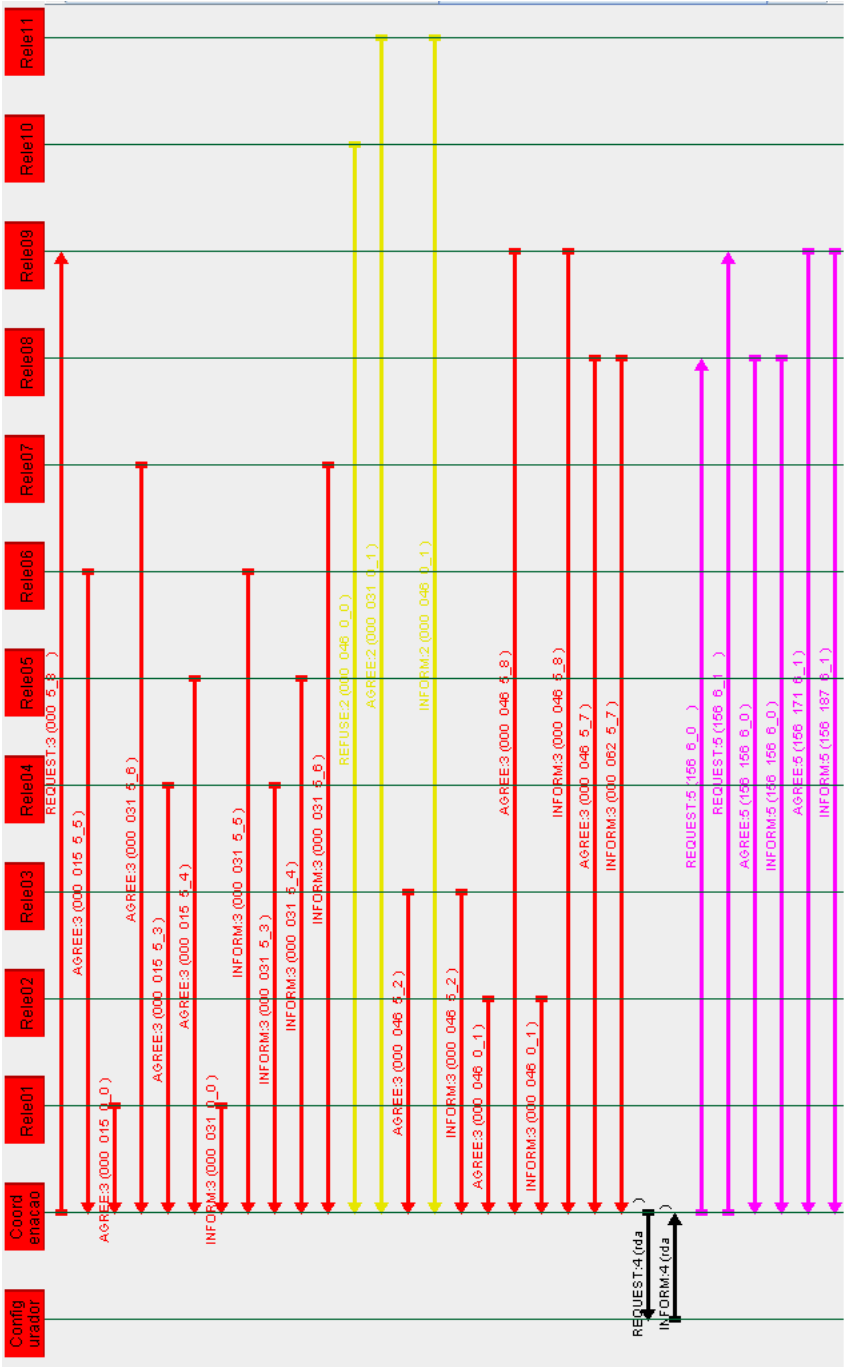


Figura 6.8 – Mensagens trocadas entre os agentes na proteção de retaguarda

Os tempos de operação do sistema de proteção com o SMA proposto são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Tempo (ms) de operação da proteção primária e retaguarda do SMA para simulação Tipo 1

Proteção	Relé	Tempo de operação (ms)
Primária	10	Não operou
	11	
Retaguarda	8	226
	9	225

O tempo de operação da proteção primária apresentado é composto dos 20 ms de troca de mensagem dos agente fisicamente distribuídos (2 vezes o trecho entre Relé e Coordenação, com 10 ms cada trecho) e o tempo de processamento do SMA proposto (já considera os 20 ms da inicialização do agente Coordenação). Já o tempo de operação para a proteção de retaguarda é obtido somando-se 4 vezes o tempo de comunicação, ao tempo de confirmação de falha de disjuntor (117 ms), e ao tempo de processamento do SMA (que também já considera os 20 ms da inicialização do agente Coordenação).

6.3.2 Simulações Tipo 2: Comportamento para faltas fase-terra

Conforme já mencionado, para sistemas com transformadores delta-estrela na conexão da geração distribuída a detecção de faltas fase-terra quando esta permanece na parte isolada do sistema não é possível apenas pela proteção de sobrecorrente. As simulações de faltas fase-terra, mostradas na Figura 6.9, demonstram o comportamento dos sistemas de proteção real e SMA considerando apenas a atuação da proteção de sobrecorrente. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5, sendo que a letra N que acompanha os números dos relés indica a função de sobrecorrente de neutro.

Pode-se verificar que, conforme o esperado, na proteção do sistema real os relés de sobrecorrente atuam apenas de forma a desconectar a rede com falta, criando assim uma subrede que continua com a falta. Com o isolamento do subsistema do sistema principal, esta falta não é mais sentida pelos relés de sobrecorrente responsáveis pela proteção dos alimentadores, que interrompem a contagem de tempo para o envio de sinal de abertura para o disjuntor e assim a falta persiste. Para evitar situações como esta, é necessário a aplicação de

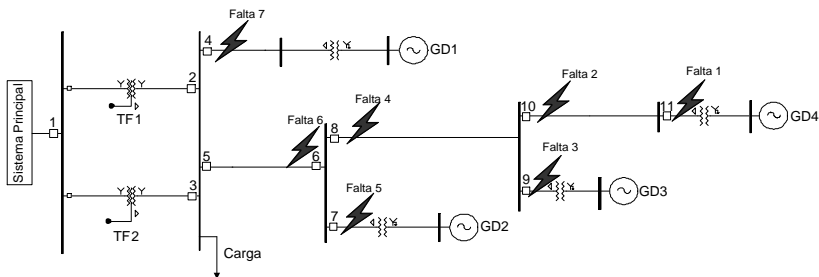


Figura 6.9 – Simulações Tipo 2 - Localização faltas fase-terra

Tabela 5 – Operação dos sistemas para faltas fase-terra

Falta	Sistema Real			SMA		
	Relés que atuam	Corrente Detectada (A)	Tempo (ms)	Relés que atuam	Corrente Detectada (A)	Tempo (ms)
Falta 1	11N	812,4	200	11	812,4	83
Falta 2	10N	1076,3	400	10	1076	82
Falta 3	9N	1076	200	9	98,5	84
Falta 4	8N	1404	600	8	1404	84
Falta 5	7N	1404	200	9	110	83
Falta 6	5N	1410	800	10	101	84
Falta 7	4	7083,6	150	7	1410	83
				6	329	83
				4	7083,6	82

funções adicionais baseadas em tensão e frequência na proteção das unidades de geração distribuída para detectar a falta dentro desta subrede e isolá-la de forma adequada. O mesmo não ocorre para o SMA, que possui naturalmente (devido as regras do agente Configurador) a função de isolar a falta de ambas as alimentações.

6.3.3 Simulações Tipo 3: Ganho de velocidade nas proteções primária e de retaguarda

Com o objetivo de demonstrar o aumento de velocidade nas proteções primária e de retaguarda no sistema, uma falta fase-fase na linha 3 é simulada. O esquema de proteção deste sistema para uma falta localizada neste ponto é ilustrado na Figura 6.10. Os relés 8, 9 e 10 devem operar para isolar a falta como proteção primária; já os relés 6 e 7 fornecem proteção de retaguarda para o relé 8, e o relé 11 deve operar na falha do relé 10.

O tempo de operação dos relés da distribuidora de energia elétrica

Tabela 8 – Tempo (ms) de operação da proteção de retaguarda do relé 10 para falta fase-fase na linha 3

Relé	Corrente Detectada (A)	Tempo de operação (ms)	
		Sistema Real	SMA
11	309	800	226

forma com que foi observado na subseção 6.3.2, estes são ajustes pré-definidos de forma que a coordenação e seletividade para faltas nos dois sentidos esteja garantida. Por outro lado, com a coordenação *on-line* do sistema multiagente os tempos de operação primária chegam a ser 7 vezes menores neste caso, pois independem da localização da falta. O mesmo ocorre com o tempo de operação da proteção de retaguarda, que para este caso é pelo menos 3 vezes maior na proteção tradicional.

6.3.4 Simulações Tipo 4: Ganho de velocidade nas proteções de retaguarda por facilidade de coordenação

Na coordenação de sistemas de proteção tradicionais, a diversidade de configurações possíveis com a adição da geração distribuída, tipos de falta e localização das faltas são fatores que influenciam na complexidade do estudo para a definição dos ajustes dos relés. Na Figura 6.11 são mostradas as faltas simuladas no sistema-teste para demonstrar a diferença nos tempos de operação definidos pela coordenação tradicional e os alcançados pelo SMA no relés de retaguarda de cada zona protegida, aproximando as faltas simuladas do sistema principal e consequentemente afetando o número de unidades de GD à jusante da falta na linha. Foram simuladas faltas trifásicas no lado de alta tensão dos transformadores ligados às unidades de GD.

- Falta 1

Para as três faltas simuladas a proteção primária do sistema tradicional opera em 200 ms. Para a falta 1 o relé 11 é o de proteção primária e o relé 10 é o responsável pela retaguarda. Supondo uma falha do disjuntor 11, tem-se os tempos de atuação da retaguarda para o SMA e o do sistema real na Tabela 9.

Neste caso a proteção de retaguarda atua 200 ms após a proteção primária, sendo o GD4 a única unidade de GD à jusante na linha.

- Falta 2

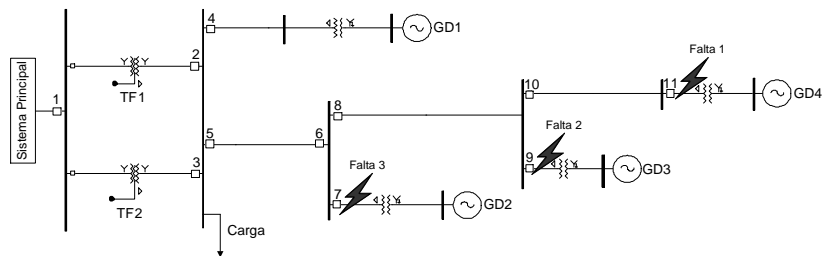


Figura 6.11 – Simulações Tipo 4

Tabela 9 – Tempo (ms) de operação da proteção de retaguarda do relé 11 para Falta 1

Relé	Corrente Detectada (A)	Tempo de operação (ms)	
		Sistema Real	SMA
10	1577	400	215

Para a falta 2 o relé 9 é a proteção primária e os relés 8 e 10 são retaguarda. Considerando a falha do disjuntor 9, os tempos de operação da proteção de retaguarda dos dois sistemas são mostrados na Tabela 10

Tabela 10 – Tempo (ms) de operação da proteção de retaguarda do relé 9 para Falta 2

Relé	Corrente Detectada (A)	Tempo de operação (ms)	
		Sistema Real	SMA
10	333	680	223
8	1753	600	225

A proteção de retaguarda tradicional neste caso opera acima de 400 ms após a proteção primária, sendo agora os GD3 e GD4 as unidades de GD à jusante na linha.

• Falta 3

Para a falta 3 a proteção primária é fornecida pelo relé 7, enquanto os relés 6 e 8 são responsáveis pela retaguarda. Na ocorrência da falha do disjuntor 7, os tempos de operação da proteção de retaguarda do SMA e sistema real são mostrados na Tabela 11

Para este caso a diferença entre a operação da proteção primária e a de retaguarda tradicional é de pelo menos 600 ms, tendo à jusante

Tabela 11 – Tempo (ms) de operação da proteção de retaguarda do relé 7 para Falta 3

Relé	Corrente Detectada (A)	Tempo de operação (ms)	
		Sistema Real	SMA
8	645	740	226
6	1880	800	224

GD2, GD3 e GD4.

Estas simulações demonstram que, para o sistema tradicional a necessidade de coordenar com os outros relés até a extremidade do ramal torna mais lenta a operação da proteção. Além disso, quanto mais unidades de geração distribuída à jusante do relé a ser coordenado, maiores são os tempos de operação afim de garantir a seletividade nas zonas protegidas, o que prejudica a velocidade da proteção de retaguarda devido aos seus tempos pré-definidos. Entretanto, como pode ser verificado pelos valores de atuação da proteção pelo SMA, a localização da falta não influencia no tempo de atuação da proteção, isso porque a coordenação ocorre de forma *on-line* após a identificação do agente (relé ou disjuntor) com falha.

6.3.5 Simulação Tipo 5: Proteção anti-ilhamento sem necessidade de funções extras

Conforme já mencionado, os ajustes fornecidos pela distribuidora de energia possuem o objetivo de apenas isolar a falta do sistema principal, sendo de responsabilidade do acessante a proteção da rede isolada e possíveis ilhamentos. Entretanto, para demonstrar a flexibilidade alcançada utilizando o SMA, foi implementada uma filosofia diferenciada para situações em que é de responsabilidade dos agentes do sistema evitar o ilhamento. Essa diferença foi descrita na seção 5.2, e para o operador significaria apenas a escolha no SMA entre o agente Configurador com a proteção anti-ilhamento e o sem esta proteção. Já para a concessionária com a proteção tradicional, seriam necessários novos estudos para os novos ajustes e novas funcionalidades além da necessidade de ida a campo para a mudança desses parâmetros.

Para demonstrar isso, é necessário que se faça uma mudança no sistema-teste para que se acrescente alguma carga distribuída no sistema. Na Figura 6.12 é mostrado um caso em que uma carga foi conectada à unidade GD3, e uma falta trifásica é simulada na Linha 2 (90%). É possível verificar que com a operação da proteção tradicional

com os ajustes atuais, Tabela 12, uma ilha seria formada com a carga junto à GD3. Caso fosse de interesse da distribuidora garantir que não haja o ilhamento, novas funcionalidades e novos ajustes seriam necessários. E este problema se repetiria a cada nova carga adicionada no sistema.

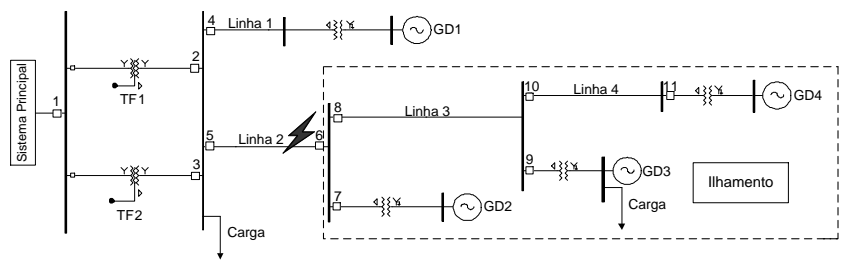


Figura 6.12 – Simulação anti-ilhamento

Tabela 12 – Tempo (ms) de operação da proteção do sistema tradicional para falta trifásica na linha 3

Relé	Corrente Detectada (A)	Tempo de operação (ms)
5	1884	850
6	1008	360

Já para o SMA, agora ajustado para a proteção anti-ilhamento, parte da troca de mensagem entre os agentes pode ser verificada na Figura 6.13. Em azul estão as mensagens do agente Coordenação solicitando a proteção primária para o Configurador e sua resposta, e em seguida as mensagens em vermelho, no sentido do agente Coordenação para os agentes Relé, estão os *request* de bloqueio do disjuntor, e em amarelo os de abrir o disjuntor. Os tempos de atuação do SMA são mostrados na Tabela 13.

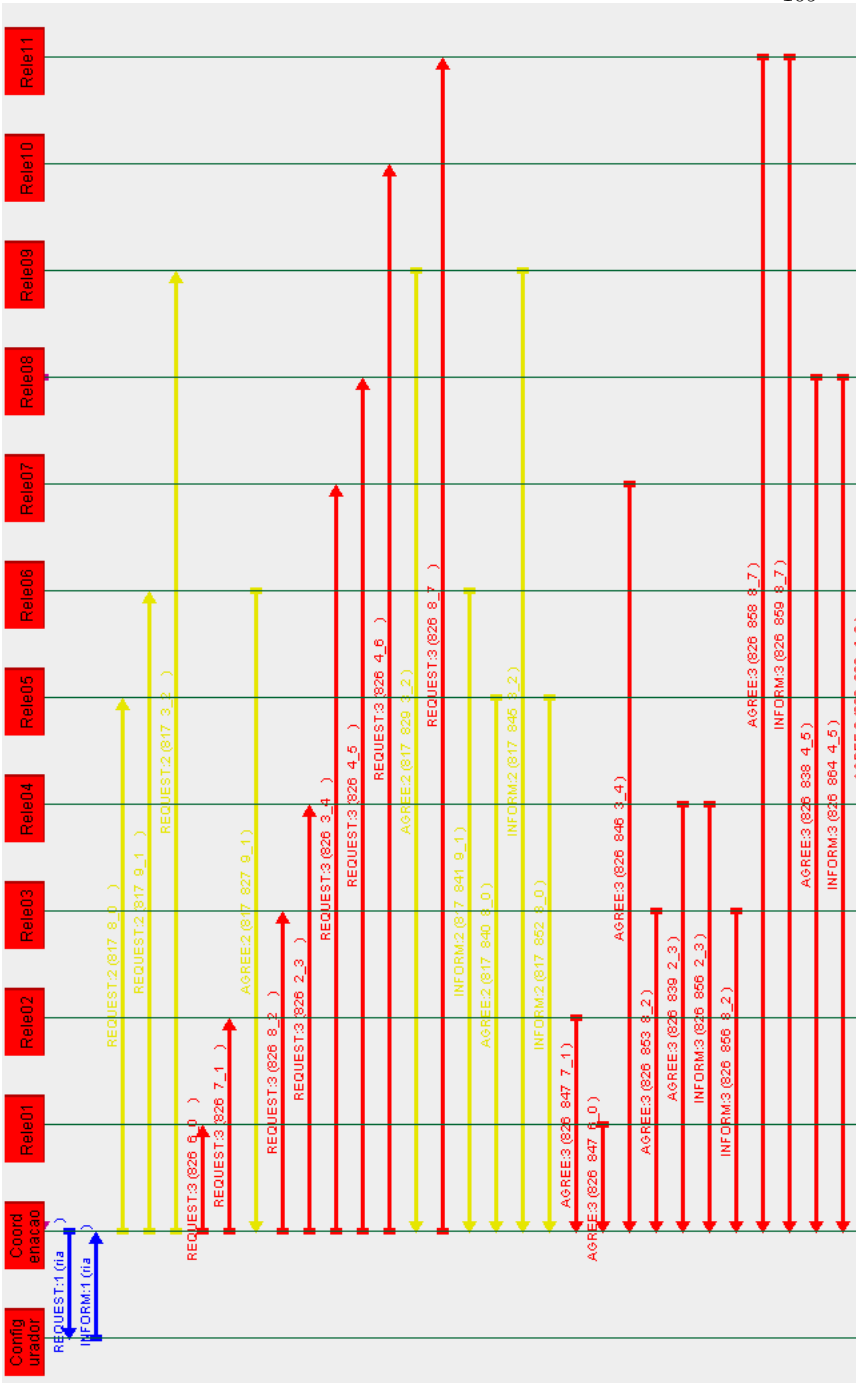


Figura 6.13 – Mensagens trocadas entre os agentes na proteção anti-ilhamento

Tabela 13 – Tempo (ms) de operação da proteção do SMA para falta trifásica na linha 3 com proteção anti-ilhamento

Relé	Corrente Detectada (A)	Tempo de operação (ms)
5	1884	81
6	1008	82
9	340	82

Vê-se que os relés que operam são os da linha 2 para isolar a falta e também o relé 9 da PCH com a carga para garantir que não haja ilhamento. Ao contrário da proteção tradicional, caso mais cargas sejam adicionadas ao sistema não é necessário nenhuma mudança no sistema. Isso porque as regras do sistema especialista são gerais, bastando que seja incluída no arquivo de dados do sistema a informação da carga conectada no circuito.

Uma observação quanto aos ajustes do sistema real para correntes reversas nos relés das PCHs deve ser feita. Em conversa com os especialistas responsáveis por tais ajustes foi esclarecido que o valor de 200 ms para a operação, e não de forma instantânea, foi obtido através de diversos testes em que verificou-se que valores menores causavam muitas atuações indevidas devido a alta sensibilidade à transitórios. Tendo isso, os tempos de atuação da proteção primária sofreriam um acréscimo caso fosse levado em consideração um *delay* afim de evitar tais operações indevidas. Ou também, poderia ser criada uma função no agente para a análise dessas correntes em que determinadas situações de transitório fossem desconsideradas, não sendo então um *delay* pré-definido para todas as situações.

6.4 CONCLUSÕES

Neste capítulo foi possível verificar através dos resultados apresentados as vantagens oferecidas pelo Sistema Multiagente proposto considerando o comparativo realizado com o sistema-teste utilizado. Com a simulação realizada na subseção 6.3.1 o funcionamento do sistema foi explorado de forma mais detalhada, assim como foram mostradas algumas ferramentas utilizadas para o acompanhamento das mensagens trocadas entre os agentes, aspecto fundamental para a obtenção dos resultados.

Uma característica importante do sistema-teste é a ligação delta-estrela dos transformadores de conexão das unidades de GD ao sistema, que impede a detecção de uma falta fase-terra após a desconexão com

o sistema principal apenas com a proteção de sobrecorrente. Com isso, duas situações podem ocorrer: ilhamento com a falta caso o subsistema possua uma carga, ou caso não haja carga na área isolada, a falta pode permanecer sem ser percebida representando perigo às equipes de manutenção da rede elétrica, além de poder causar danos com religamentos sem o conhecimento de sua existência. Foram mostradas nas simulações das subseções 6.3.5 e 6.3.2 que com o SMA proposto não seriam necessárias funções adicionais para evitar tais situações, tendo em vista que após a localização da falta pelo SMA todos os relés responsáveis pelo isolamento da falta já recebem o comando de abertura.

Outro ponto demonstrado com os resultados obtidos é o ganho de velocidade no tempo de operação das proteções primária e de retaguarda com relações ao tempo obtido com a proteção tradicional. Nas subseções 6.3.3 e 6.3.4 são expostas situações em que se verifica a relação dos tempos de operação da proteção tradicional com a localização da falta, enquanto que para o SMA proposto não há diferença. Isso porque a coordenação do SMA é feita de forma *on-line* através da comunicação dos agentes. Com isso, a operação da proteção do SMA pode chegar a ser 7 vezes mais rápida que a tradicional.

Além disso, como os agentes Relés possuem os ajustes tradicionais para operação, o sistema é robusto em relação à perda de comunicação entre os agentes.

7 CONCLUSÕES FINAIS

Os investimentos em pesquisas e novas tecnologias para os sistemas de potência com a finalidade de concretizar as redes inteligentes estão abrindo caminhos com novos desafios, mas ao mesmo tempo fornecendo soluções e melhorias para problemas já existentes. A inserção de unidades de geração distribuída nas redes de distribuição já é realidade, mas ainda existem aspectos que precisam ser melhor desenvolvidos para que se garanta a qualidade e segurança do fornecimento de energia elétrica ao mesmo tempo que isso não seja uma tarefa onerosa para as concessionárias.

Através das pesquisas realizadas observou-se que um dos principais aspectos impactados com a adição de unidades de GD é a proteção dos sistemas de distribuição. Da mesma forma, também verificou-se que a abordagem de sistemas multiagentes está sendo amplamente utilizada em diversas questões relacionadas às novas configurações do sistema (adição de GD, microrredes e redes inteligentes). Com isso, este trabalho propõe uma arquitetura multiagente para a coordenação de relés de sobrecorrente na proteção de sistemas radiais na presença de geração distribuída.

Com as simulações realizadas com os dados e verificação dos ajustes disponibilizados pela distribuidora de energia foi possível verificar pontos de complexidade para a realização do projeto do sistema de proteção, além de pontos com alto tempo de operação da proteção. Já o estudo dos sistemas multiagentes permitiu que se elaborasse uma arquitetura para o tratamento dos pontos problemáticos identificados, desenvolvimento do sistema proposto na plataforma JADE, e obtenção dos resultados através das simulações realizadas no sistema implementado.

Através dos testes foi possível observar que o sistema proposto apresenta um tempo de operação para as proteções primária e de retaguarda significativamente menores que os tempos do sistema tradicional devido a coordenação *on-line* atingida através das comunicações entre agentes, independentemente da localização da falta. Além disso, para a proteção tradicional o tipo de ligação dos transformadores delta-estrela na conexão das unidades de GD no sistema acarreta problemas em faltas fase-terra, o que não ocorre no SMA proposto, pois o isolamento da falta é garantido com os comandos de abertura enviados a todos os relés logo após a localização da falta ser feita pelo SMA. Outra característica importante do SMA desenvolvido é que a adição de novos componentes

(novos agentes Relés, devido à instalação de novas unidades de GD) na plataforma é feita de forma automática pelo sistema, bastando apenas a inclusão dos novos dados do sistema nos arquivos de dados. Assim, não há necessidade de serem refeitos os estudos de proteção a cada novo elemento adicionado ao sistema.

7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Algumas sugestões para trabalhos futuros são listadas abaixo:

- Adicionar funcionalidades aos agentes já existentes, como rotinas de detecção de falta através da análise de transitórios e identificação de falta já isolada;
- Criação de agentes para considerar o ilhamento da rede, incluindo rotinas de corte de carga com controle de qualidade de fornecimento de energia;
- Criação e adição de agentes para a proteção de geradores no sistema.

ANEXO A – Ajustes dos Relés do Sistema-Teste

Por simplificação, neste trabalho serão apresentados os ajustes dos relés considerando para frente no sentido GD para sistema principal e para trás do sistema principal para a GD.

Tabela 14 – Ajustes dos Relés do Sistema-teste

Relé	RTC	Para Frente				Para Trás	
		Curva Inversa		Tempo Definido		Tempo Definido	
		<i>Time Dial</i>	<i>Pickup</i> (A)	Ciclos (60Hz)	<i>Pickup</i> (A)	Ciclos (60 Hz)	<i>Pickup</i> (A)
6	80	0,06	4	48	5	48	1,00
7	40	0,12	2,75	48	3,75	12	1,00
8	60	0,11	3,85	-	-	36	1,00
9	40	0,12	2,75	48	3,75	12	1,00
10	60	0,10	2	-	-	24	0,65
11	30	0,12	4	48	6	12	1,50

O religador (agente Rele 5) possui seu *pickup* em 320 A, *Time Dial* 0,22, e para Alta Corrente ajuste de 3000 A para atuação em 0,2 s.

Todos os relés e o religador utilizam a curva IEC Normalmente Inversa

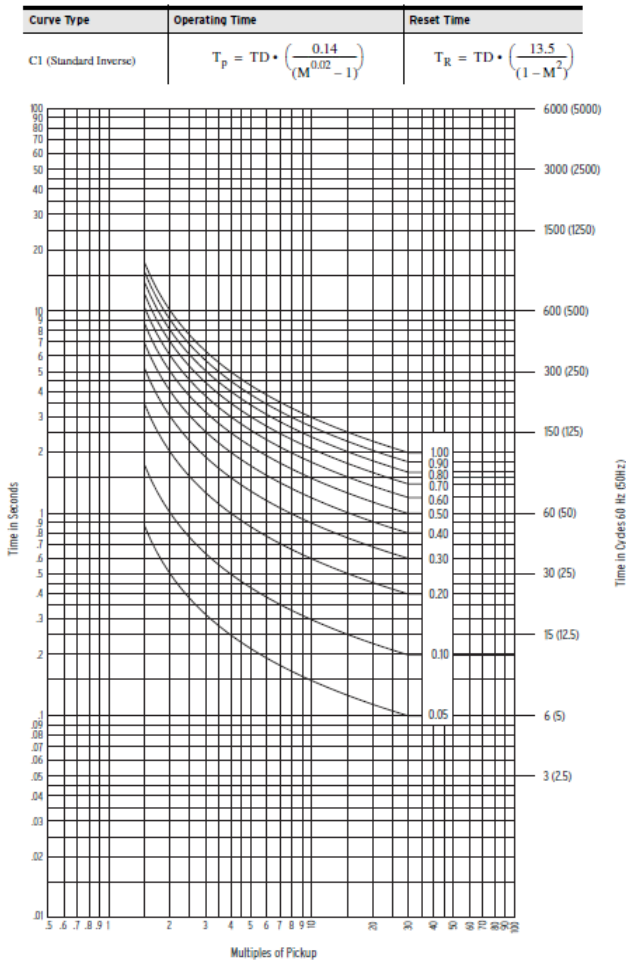


Figura A.1 – IEC Normalmente Inversa [11]

ANEXO B – Dados originais do sistema real para ANAFAS

(EQUIVALENTE NA BARRA DE 138 kV da SE SMD

0	34204	4.343018.8242.087916.263		4	
(TRAFO TT-3 DA SE SMD 138/23/4,16 kV					
34386	34209	3T-0.280-3.940-0.010-0.199TT-3		4	
34386	34388	3T2.960042.3509999999999TT-3			4-30
34386	34204	3T5.060072.3704.170059.691TT-3		4	
34386	0	3T999999999992.690038.419TT-3		34388	3 4
(TRAFO TT-4 DA SE SMD 138/23/4,16 kV					
34208	34209	4T-0.150-2.390-0.000-1.350TT-4		4	
34208	34622	4T3.750042.1709999999999TT-4			4-30
34208	34204	4T6.260072.2606.410073.300TT-4		4	
34208	0	4T999999999993.600041.130TT-4		34622	4 4
(REPRESENTAÇÃO DA PCH SALTO DAS FLORES					
34209	34441	1L36.60075.60071.040375.48LT		4	12.0
34442	34441	1T 075.0009999999999TT-1		1	30
34442	0	1T99999999999 075.000TT-1		34441	1 1
0	34442	2G 0296.3099999999999		1	
0	34442	1G 0296.3099999999999		1	
(REPRESENTAÇÃO DA PCH PRATA					
34209	90000	1L0.01000.01000.01000.0100		4	0.0
90000	90001	1L55.990125.40116.59659.93		4	21.0
90000	90001	2L55.990125.40116.59659.93		4	21.0
90001	34592	1L0.01000.01000.01000.0100		4	0.0
34572	34592	1T 0179.1099999999999TR-1		4	30
34572	0	1T9999999999999 0179.10TR-1		34592	1 4

0	34572	2G	01024.1999999999999	4
0	34572	1G	01024.1999999999999	4
(REPRESENTAÇÃO DA PCH BANDEIRANTE				
34592	34593	1L10.70023.98022.300126.19	4	4.01
34575	34593	1T 0179.10999999999999TR-1	4	30
34575	0	1T9999999999999999 0179.10TR-1	34593	1 4
0	34575	2G	01024.1999999999999	4
0	34575	1G	01024.1999999999999	4
(REPRESENTAÇÃO DA PCH BELMONT				
34593	34594	1L13.94031.22029.020164.27	4	5.22
34573	34594	1T 0150.00999999999999TR-1	4	30
34573	0	1T9999999999999999 0150.00TR-1	34594	1 4
0	34573	3G	01699.2999999999999	4
0	34573	2G	01699.2999999999999	4
0	34573	1G	01699.2999999999999	4
99999				

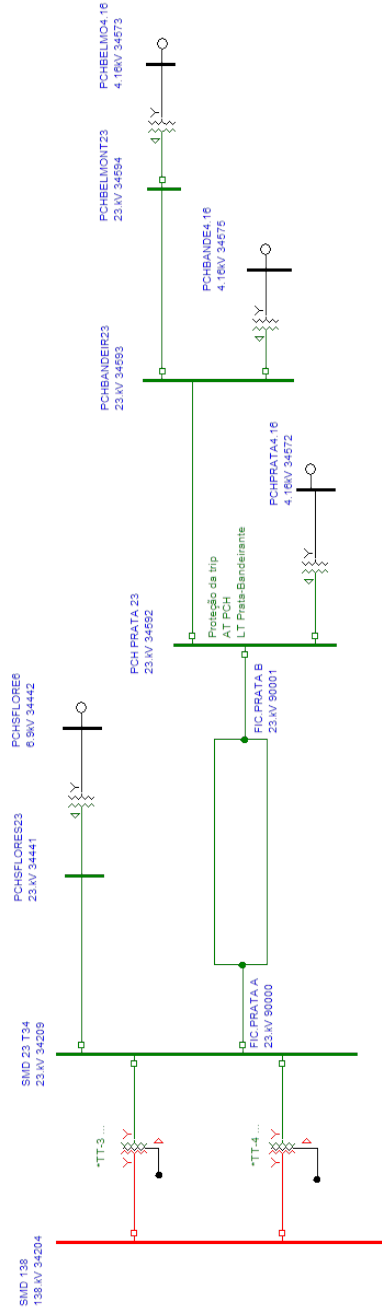


Figura B.1 – Sistema original

REFERÊNCIAS

- [1] ENEDIS: Energia Distribuída. Disponível em: <<http://www.enedis.com>>. Acesso em: 13/04/2014.
- [2] DIAS, M. V. X.; BORTONI, E. d. C.; HADDAD, J. Geração distribuída no brasil: oportunidades e barreiras. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO BRASÍLIA. *CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO*. [S.l.], 2006. v. 5.
- [3] HATZIARGYRIOU, N.; TSIKALAKIS, A.; VLACHOGIANNIS, J.; PAPADOGIANNIS, K.; KARINIOTAKIS, G.; LOPES, J.; OYARZABAL, J.; MOREIRA, C.; MADUREIRA, A.; COBELO, I. Microgrid central controller strategies and algorithms, deliverable_dc1. 2004.
- [4] HATZIARGYRIOU, N.; ASANO, H.; IRAVANI, R.; MARNAY, C. Microgrids: An overview of ongoing research, development, and demonstration projects. *Power and Energy Magazine, IEEE*, IEEE, v. 5, n. 4, p. 78–94, 2007.
- [5] FILHO, J. M. *Manual de equipamentos elétricos*. [S.l.]: LTC, 2005.
- [6] HÜBNER, J. F. *Um modelo de reorganização de sistemas multiagentes*. Tese (Doutorado em Sistemas Digitais) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3141/tde-17052004-151854/>>.
- [7] WOOLDRIDGE, M. *An introduction to multiagent systems*. [S.l.]: Wiley, 2002.
- [8] STEPHENS, L. M.; HUHS, M. N. Agent communications. In: WEISS, G. (Ed.). *Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*. London: The MIT Press, 1999. p. 79–120.
- [9] BELLIFEMINE, F.; CAIRE, G.; GREENWOOD, D. *Developing multi-agent systems with JADE*. [S.l.]: Wiley, 2007.

- [10] JADE'S Tutorial. <http://jade.tilab.com/doc/tutorials/JADEAdmin/jadeArchitecture.html>: [s.n.].
- [11] SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, INC. *SEL-351A, -1 Relay, Distribution Protection System, Instruction Manual*. 2009.
- [12] DRIESEN, J.; KATIRAEI, F. Design for distributed energy resources. *Power and Energy Magazine, IEEE*, IEEE, v. 6, n. 3, p. 30–40, 2008.
- [13] SMARTGRIDS, E. Strategic deployment document for europe's electricity networks of the future. *European Technology Platform SmartGrids*. Brussels, 2010.
- [14] FARHANGI, H. The path of the smart grid. *Power and Energy Magazine, IEEE*, IEEE, v. 8, n. 1, p. 18–28, 2010.
- [15] BARKER, P.; MELLO, R. D. Determining the impact of distributed generation on power systems. in radial distribution systems. In: IEEE. *Power Engineering Society Summer Meeting, 2000. IEEE*. [S.l.], 2000. v. 3, p. 1645–1656.
- [16] KINDERMANN, G. *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*. 3 edição. ed. Florianópolis: [s.n.], 2012.
- [17] CIGRE. *Impact of increasing contribution of dispersed generation on the power system*. [S.l.], Fevereiro 1999.
- [18] PEPERMANS, G.; DRIESEN, J.; HAESELDONCKX, D.; BELMANS, R.; D'HAESELEER, W. Distributed generation: definition, benefits and issues. *Energy policy*, Elsevier, v. 33, n. 6, p. 787–798, 2005.
- [19] ANEEL. Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST. Módulo 1, 2012.
- [20] CARDOSO, G. S. *Uma visão crítica do cenário da Geração Distribuída no Brasil*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do ABC, 2009.
- [21] CAMARGO, C. C. B. *Transmissão de Energia Elétrica: Aspectos Fundamentais*. 3. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2006.

- [22] KHOA, T. Q. D.; BINH, P. T. T.; TRAN, H. B. Optimizing location and sizing of distributed generation in distribution systems. In: IEEE. *Power Systems Conference and Exposition, 2006. PSCE'06. 2006 IEEE PES*. [S.l.], 2006. p. 725–732.
- [23] ACKERMANN, T.; KNYAZKIN, V. Interaction between distributed generation and the distribution network: operation aspects. In: IEEE. *Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES*. [S.l.], 2002. v. 2, p. 1357–1362.
- [24] HATZIARGYRIOU, N. Microgrids, the key to unlock distributed energy resources? *IEEE Power and Energy Magazine*, v. 6, n. 3, p. 26–29, 2008.
- [25] IEEE STANDARDS ASSOCIATION. *IEEE Guide for Design, Operation, and Integration of Distributed Resource Island Systems with Electric Power Systems*. 2011.
- [26] KROPOSKI, B.; LASSETER, R.; ISE, T.; MOROZUMI, S.; PAPATLIANASSIOU, S.; HATZIARGYRIOU, N. Making microgrids work: A look at microgrid technologies and testing projects from around the world. *Power and Energy Magazine, IEEE*, IEEE, v. 6, n. 3, p. 40–53, 2008.
- [27] KYTHNOS Microgrid. Disponível em: <<http://microgrids.eu/index.php?page=kythnos&id=2>>. Acesso em: 13/04/2014.
- [28] HATZIARGYRIOU, N.; DIMEAS, A.; HATZIVASILADIS, S.; VANDENBERGH, M.; GEIPEL, R.; TSELEPIS, S. Experimental validation of islanding mode of operation. In: _____. *Advanced Architectures and Control Concepts for MORE MICRO-GRIDS*. [S.l.: s.n.], 2009.
- [29] LASSETER, R.; AKHIL, A.; MARNAY, C.; STEPHENS, J.; DAGLE, J.; GUTTROMSON, R.; MELIOPOULOUS, A.; YINGER, R.; ETO, J. The certs microgrid concept, white paper on integration of distributed energy resources. *California Energy Commission, Office of Power Technologies-US Department of Energy*, 2002.
- [30] MOROZUMI, S. Overview of micro-grid R&D in Japan. In: *Micro-Grid Symposium in Nagoya*. [S.l.: s.n.], 2007.

- [31] GIGUER, S. *Proteção de sistemas de distribuição*. Porto Alegre: Sagra, 1988.
- [32] GIRGIS, A.; BRAHMA, S. Effect of distributed generation on protective device coordination in distribution system. In: IEEE. *Power Engineering, 2001. LESCOPE'01. 2001 Large Engineering Systems Conference on*. [S.l.], 2001. p. 115–119.
- [33] RUSSELL, S.; NORVIG, P. *Artificial Intelligence: A modern approach*. [S.l.]: Prentice-Hall, 1995.
- [34] FRANKLIN, S.; GRAESSER, A. Is it an agent, or just a program?: A taxonomy for autonomous agents. *Intelligent Agents III Agent Theories, Architectures, and Languages*, Springer, p. 21–35, 1997.
- [35] WOOLDRIDGE, M.; JENNINGS, N. Intelligent agents: Theory and practice. *Knowledge engineering review*, Cambridge Univ. Press, v. 10, n. 2, p. 115–152, 1995.
- [36] GOODWIN, R. Formalizing properties of agents. *Journal of Logic and Computation*, Oxford Univ Press, v. 5, n. 6, p. 763–781, 1995.
- [37] WOOLDRIDGE, M. Intelligent agents. In: WEISS, G. (Ed.). *Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*. London: The MIT Press, 1999. p. 27–77.
- [38] BITTENCOURT, G. *Inteligência Artificial: Ferramentas e Teorias*. [S.l.]: Editora da UFSC, 2006.
- [39] TEODOROVIC, D. Transport modeling by multi-agent systems: a swarm intelligence approach. *Transportation Planning and Technology*, Taylor & Francis, v. 26, n. 4, p. 289–312, 2003.
- [40] STEFANO, B. N. D.; LAWNICZAK, A. T. Cognitive agents: Functionality & performance requirements and a proposed software architecture. In: IEEE. *Science and Technology for Humanity (TIC-STH), 2009 IEEE Toronto International Conference*. [S.l.], 2009. p. 509–514.
- [41] COPPIN, B. *Inteligência artificial. LTC, Rio de Janeiro*, 2010.
- [42] BOND, A.; GASSER, L. Distributed artificial intelligence. *Communication, Co*, 1988.

- [43] FERBER, J. *Multi-agent systems: an introduction to distributed artificial intelligence*. [S.l.]: Addison-Wesley, 1995.
- [44] HORLING, B.; LESSER, V. A survey of multi-agent organizational paradigms. *The Knowledge Engineering Review*, Cambridge Univ Press, v. 19, n. 04, p. 281–316, 2004.
- [45] TOMITA, Y.; FUKUI, C.; KUDO, H.; KODA, J.; YABE, K. A cooperative protection system with an agent model. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 13, n. 4, p. 1060–1066, 1998.
- [46] ZHU, Y.; SONG, S.; WANG, D. Multiagents-based wide area protection with best-effort adaptive strategy. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 31, n. 2-3, p. 94–99, 2009.
- [47] MORAIS, D.; BENCZ, E.; ROLIM, J. Condition assessment of power transformers through the integration of historical and on-line data in a multi-agent system. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, Springer US, v. 25, n. 1, p. 93–102, 2014. ISSN 2195-3880.
- [48] HOSSACK, J.; MENAL, J.; MCARTHUR, S.; MCDONALD, J. A multiagent architecture for protection engineering diagnostic assistance. *Power Systems, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 18, n. 2, p. 639–647, 2003.
- [49] MCARTHUR, S. D. J.; MCDONALD, J. R.; HOSSACK, J. A. A multi-agent approach to power system disturbance diagnosis. In: _____. *Autonomous Systems and Intelligent Agents in Power System Control and Operation (Power Systems)*. New York: Springer - Verlag, 2003. cap. 5, p. 75–99.
- [50] DAVIDSON, E. M.; MCARTHUR, S. D.; MCDONALD, J. R.; CUMMING, T.; WATT, I. Applying multi-agent system technology in practice: automated management and analysis of scada and digital fault recorder data. *Power Systems, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 21, n. 2, p. 559–567, 2006.
- [51] NAPIER, G.; DAVIDSON, E.; MCARTHUR, S.; MCDONALD, J. An automated fault analysis system for sp energy networks: Requirements, design and implementation. In: IEEE. *Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES'09. IEEE*. [S.l.], 2009. p. 1–7.

- [52] CELESC. *Requisitos para a Conexão de Micro ou Mini Geradores de Energia ao Sistema de Elétrico da Celesc Distribuição*. 2012.
- [53] CHEN, Z.; KONG, W. Protection coordination based on multi-agent for distribution power system with distribution generation units. *International Workshop on Next Generation Regional Energy System Development, Seoul*, 2007.
- [54] IEEE STANDARDS ASSOCIATION. *IEEE Guide for Breaker Failure Protection of Power Circuit Breakers*. 2006.